



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## ÚZKOPÁSMOVÁ PLC KOMUNIKACE S VYSOKOU DATOVOU RYCHLOSTÍ NA BÁZI OFDM TECHNIKY

HIGH DATA RATE NARROWBAND PLC COMMUNICATION BASED ON OFDM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

PATRIK CSIBA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MLÝNEK, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Patrik Csiba

**ID:** 149835

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Úzkopásmová PLC komunikace s vysokou datovou rychlostí na bázi OFDM  
techniky**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s technologií datové komunikace po silnoproudém vedení. Analyzujte úzkopásmové standardy a proveďte jejich porovnání. Pomocí vývojových kitů C2000 Power Line Modem Developer's Kit proveďte sadu měření v laboratorním a reálném prostředí. Zaměřte se především na datovou rychlost, dosah komunikace a vliv rušení. Porovnejte komunikaci na bázi OFDM techniky a technik s jednou nosnou.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Power line communications: theory and applications for narrowband and broadband over power lines. 1st ed. Editor Hendrik Ferreira. Chichester: John Wiley, 2010, 507 s. ISBN 978-047-0740-309.  
[2] S. Galli, A. Scaglione, Z. Wang, "For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no.6, 2011.

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 2.6.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Mlýnek, Ph.D.

**Konzultanti bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá úzkopásmovou PLC komunikací. V práci je popisována historie, princip úzkopásmové komunikace a popis čtyř dostupných úzkopásmových standardů (PRIME, G3-PLC, G.hnem, IEEE P1901.2) s jejich porovnáním. V další části jsou popisována experimentální měření, která jsou prováděna v domácím prostředí za použití dostupných modemů TMDSPCKIT od firmy Texas Instruments, MT39-L1-ver.R modemů od firmy ModemTec a EVALKITST7580-1 od firmy STMicroelectronics.

## **Klíčová slova**

Datová komunikace po silnoprůdém vedení, úzkopásmová komunikace, PRIME, G3-PLC, G.hnem, IEEE P1901.2, PLC modem

## **Abstract**

This bachelor project is about narrowband PLC communication. In this project is described history, principle of narrowband communication and description of four available narrowband standards (PRIME, G3-PLC, G.hnem, IEEE P1901.2) with their comparisons. In the next part are described the experimental measurements, that are performed in home environment with use of the TMDSPCKIT modems from the Texas Instruments company, MT39-L1-ver.R modems from the ModemTec company and EVALKITST7580-1 modems from the STMicroelectronics company.

## **Key words**

Power Line Communication, Narrowband communication, PRIME, G3-PLC, G.hnem, IEEE P1901.2, PLC modem

CSIBA, P. *Úzkopásmová PLC komunikace s vysokou datovou rychlostí na bázi OFDM techniky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 72 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Mlýnek, Ph.D..

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Úzkopásmová PLC komunikace s vysokou datovou rychlostí na bázi OFDM techniky jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Petrovi Mlýnkovi Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, připomínky, potřebnou pomoc a poskytnutí důležitých materiálů potřebných pro realizaci této bakalářské práce.

V Brně dne .....

.....  
(podpis autora)

## Obsah

---

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2. PRINCIP PLC .....</b>	<b>12</b>
2.1. Rušení .....	12
<b>3. ROZDĚLENÍ PLC .....</b>	<b>13</b>
3.1. Úzkopásmová komunikace.....	13
3.1.1. Historie úzkopásmové komunikace .....	14
3.2. Širokopásmová komunikace .....	15
<b>4. STANDARDY .....</b>	<b>16</b>
4.1. PRIME.....	16
4.1.1. Architektura systému .....	17
4.2. G3-PLC.....	17
4.3. IEEE P1901.2 .....	18
4.4. ITU-T G.hnem .....	20
4.4.1. Architektura G.hnem.....	20
4.5. PLC kity.....	21
<b>5. POROVNÁNÍ STANDARDŮ.....</b>	<b>23</b>
5.1. Terénní měření standardů .....	24
<b>6. PLC KOMUNIKAČNÍ MODEMY TMDSPCKIT .....</b>	<b>26</b>
6.1. Prostředí ZERO Configuration GUI .....	27
6.1.1. Zero Configuration Mode .....	27
6.1.2. Intermediate Mode .....	28
<b>7. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PLC MODEMU TMDSPCKIT-V3.....</b>	<b>30</b>
7.1. Nastavení přenosových parametrů a popis testu .....	30
7.1.1. PHY test.....	30
7.1.2. Přenos souboru.....	31

7.1.3.	Testování provozu.....	32
<b>7.2.</b>	<b>Výsledky měření rychlosti PLC modemů .....</b>	<b>33</b>
7.2.1.	PRIME .....	33
7.2.2.	G3-PLC.....	37
<b>7.3.</b>	<b>Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>39</b>
<b>8.</b>	<b>POPIS PROSTŘEDÍ PRO EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ .....</b>	<b>41</b>
<b>8.1.</b>	<b>Měnič .....</b>	<b>41</b>
<b>8.2.</b>	<b>Rozmístění modemů .....</b>	<b>42</b>
<b>9.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PLC MODEMU TMDSPCKIT-V4.....</b>	<b>43</b>
<b>9.1.</b>	<b>Výsledky měření rychlosti PLC modemů .....</b>	<b>43</b>
9.1.1.	PRIME .....	43
9.1.2.	G3-PLC.....	45
<b>9.2.</b>	<b>Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>47</b>
<b>10.</b>	<b>POROVNÁNÍ RŮZNÝCH VERZÍ MODEMU TMDSPCKIT .....</b>	<b>49</b>
<b>10.1.</b>	<b>Porovnání z hlediska provedených experimentů .....</b>	<b>49</b>
<b>10.2.</b>	<b>Porovnání z technického hlediska .....</b>	<b>50</b>
10.2.1.	Software .....	50
10.2.2.	Hardware.....	50
10.2.3.	Chyby funkčnosti kitu TMDSPCKIT-V4.....	51
10.2.4.	Problém komunikace u TMDSPCKIT-V4 při PRIME standardu .....	51
10.2.5.	Absence funkcí.....	52
<b>10.3.</b>	<b>Zhodnocení .....</b>	<b>52</b>
<b>11.</b>	<b>PLC KOMUNIKAČNÍ MODEMY MT39-L1-VER.R.....</b>	<b>54</b>
<b>11.1.</b>	<b>Prostředí RSET (v.1.0.11) .....</b>	<b>55</b>
<b>12.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PLC MODEMU MT39-L1-VER. R.....</b>	<b>57</b>
<b>12.1.</b>	<b>Výsledky měření rychlosti PLC modemů .....</b>	<b>57</b>
12.1.1.	Vysílač v blízkosti zdroje rušení .....	57
12.1.2.	Přijímač v blízkosti zdroje rušení.....	58
<b>12.2.</b>	<b>Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>59</b>
<b>13.</b>	<b>PLC KOMUNIKAČNÍ MODEMY EVALKITST7580-1 .....</b>	<b>60</b>
<b>13.1.</b>	<b>Prostředí ST7580 GUI .....</b>	<b>61</b>

<b>14.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PLC MODEMU EVALKITST7580-1 .....</b>	<b>62</b>
<b>14.1.</b>	<b>Výsledky experimentů .....</b>	<b>62</b>
14.1.1.	Ověření možnosti komunikace.....	62
14.1.2.	Ping Session .....	63
<b>14.2.</b>	<b>Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>63</b>
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>65</b>
<b>LITERATURA.....</b>		<b>67</b>
<b>SEZNAM ZKRATEK .....</b>		<b>71</b>



# Seznam obrázků

Obr. 1: Rozložení spektra dle normy CELENEC EN 50065-1 [15].....	13
Obr. 2: Vrstvový model standardu PRIME [3].....	16
Obr. 3: Vrstvový model standardu G3-PLC [7].....	18
Obr. 4: Vrstvový model IEEE P1901.2 standardu [14] .....	19
Obr. 5: Měřicí modem TMDSPCKIT-V3 [21].....	26
Obr. 6: Měřicí modem TMDSPCKIT-V4 [27].....	26
Obr. 7: Ukázka rozhraní Zero Configuration mode [22] .....	27
Obr. 8: Ukázka rozhraní Intermediate mode [22] .....	29
Obr. 9: Možnosti nastavení PHY testu [22] .....	31
Obr. 10: Okno pro posílání souboru mezi modemy [22] .....	31
Obr. 11: Možnosti nastavení PHY parametrů PRIME (zeleně přijímač a červeně vysílač) [22] .....	32
Obr. 12: Možnosti nastavení PHY parametrů G3-PLC (zeleně přijímač a červeně vysílač) [22].....	33
Obr. 13: Výsledek měření při D8PSK s vypnutým ROBO režimem a vypnutým FEC .....	35
Obr. 14: Výsledek měření při D8PSK se zapnutým ROBO režimem a vypnutým FEC .....	35
Obr. 15: Výsledek provozního měření při D8PSK.....	38
Obr. 16: Výsledek provozního měření při DQPSK+FEC .....	45
Obr. 17: Výsledek provozního měření při BPSK .....	47
Obr. 18: Měřicí modem MT39-L1-ver.R [32] .....	54
Obr. 19: Ukázka programového prostředí RSET .....	55
Obr. 20: Komunikace mezi modemy při prvním měření .....	58
Obr. 21: Komunikace mezi modemy při druhém měření .....	58
Obr. 22: Měřicí modem EVALKITST7580-1 [35] .....	60
Obr. 23: Ukázka programového prostředí ST7580 GUI .....	61

# Seznam tabulek

Tabulka 1: Tabulka pásem dle normy CELENEC EN 50065-1. [9].....	13
Tabulka 2: Parametry standardů PRIME, G3-PLC, IEEE P1901.2 a G.Hnem [19] .....	23
Tabulka 3: Terénní měření standardů G3 v různých pásmech [7] .....	24
Tabulka 4: Naměřené rychlosti přenosu na různých modulacích a pásmech [7].....	24
Tabulka 5: Parametry na fyzické vrstvě standardu PRIME [20].....	25
Tabulka 6: Výsledky PHY testu pro PRIME standard .....	33
Tabulka 7: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro PRIME standard .....	34
Tabulka 8: Výsledky testování provozu při zapnutém ROBO pro PRIME standard .....	36
Tabulka 9: Výsledky testování provozu při vypnutém ROBO pro PRIME standard.....	36
Tabulka 10: Výsledky PHY testu pro G3-PLC standard.....	37
Tabulka 11: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro G3-PLC standard .....	37
Tabulka 12: Výsledky testování provozu při zapnuté i vypnuté (c) koherentní modulaci pro G3-PLC standard .....	38
Tabulka 13: Výsledky PHY testu pro PRIME standard .....	43
Tabulka 14: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro PRIME standard .....	43
Tabulka 15: Výsledky testování provozu pro PRIME standard .....	44
Tabulka 16: Výsledky PHY testu pro G3-PLC standard.....	45
Tabulka 17: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro G3-PLC standard .....	45
Tabulka 18: Výsledky testování provozu při zapnuté i vypnuté (c) koherentní modulaci pro G3-PLC standard .....	46
Tabulka 19: Porovnání výsledků PHY testu dvou experimentálních měření.....	49
Tabulka 20: Porovnání výsledků přenosu souboru 72 kB dvou experimentálních měření.....	49
Tabulka 21: Porovnání výsledků testování provozu dvou experimentálních měření.....	50
Tabulka 22: Tabulka možných teoretických rychlostí [35].....	62
Tabulka 23: Výsledky Ping Session testu.....	63

# 1. Úvod

V současné době, kdy moderní technologie zasahují i do nejzazších koutů naší planety bylo nutno přijít s možností komunikace na velké vzdálenosti bez nutnosti vybudování nákladných nových sítí. Elektrické rozvodné sítě mají obrovskou infrastrukturu, která pokrývá velkou část naší planety. Celá tato infrastruktura je realizována pomocí kabelových rozvodů. V 50. letech minulého století byly přihlášeny patenty, které umožňovaly komunikaci právě po elektrických rozvodech tzv. PLC (Power Line Communication).

PLC je technologie pro přenos dat po silnoprůdém vedení. Tato technologie pomohla velmi výrazně snížit náklady v oblastech, kde je nutná komunikace mezi zařízeními a je obtížné pokládat novou kabeláž. Hlavní výhodou PLC je v tom, že není nutné vybudovávat nové kabelové vedení, ale lze využít již staré vybudované.

PLC využití je velice široké, od využití v domácnosti až pro průmyslové využití. V domácnostech se především využívá jako možnost připojení k internetu. V průmyslu se využívají v automatizaci pro dálkové ovládání strojů, řízení odběru, regulace osvětlení, atd.

Tato práce pojednává o porovnání technických vlastností různých standardů úzkopásmové PLC technologie. Hlavním cílem je prakticky změřit tyto vlastnosti v reálném prostředí s využitím modemů TMDSPLCKIT-V3, TMDSPLCKIT-V4, MT39-L1-ver.R a EVALKITST7580-1.

## **2. Princip PLC**

PLC (Power Line Communication) umožňují realizovat datovou komunikaci po elektrických napájecích sítích. Přenos dat po stávajících elektrických rozvodných sítích 50 Hz je velmi užitečný a méně nákladný než vybudování nových datových sítí. Základ celého principu spočívá v modulaci, kdy data nesoucí užitečnou informaci namodulujeme na signál o mnohem vyšší frekvenci než je frekvence napájecího napětí (50Hz) a mnohem menší amplitudou. Data jsou následně vedená po určené dráze dané dvěma koncovými body. Na druhém konci jsou užitečná data vedená přes demodulátor, který demoduluje přichodící signál a zpracuje na původní signál. Celý datový přenos je tedy poloduplexní, což znamená, že je možné signál vést obousměrně, ale pouze střídavou metodou, kdy je možné pouze v jeden časový okamžik přijímat data nebo je vysílat [1].

### **2.1. Rušení**

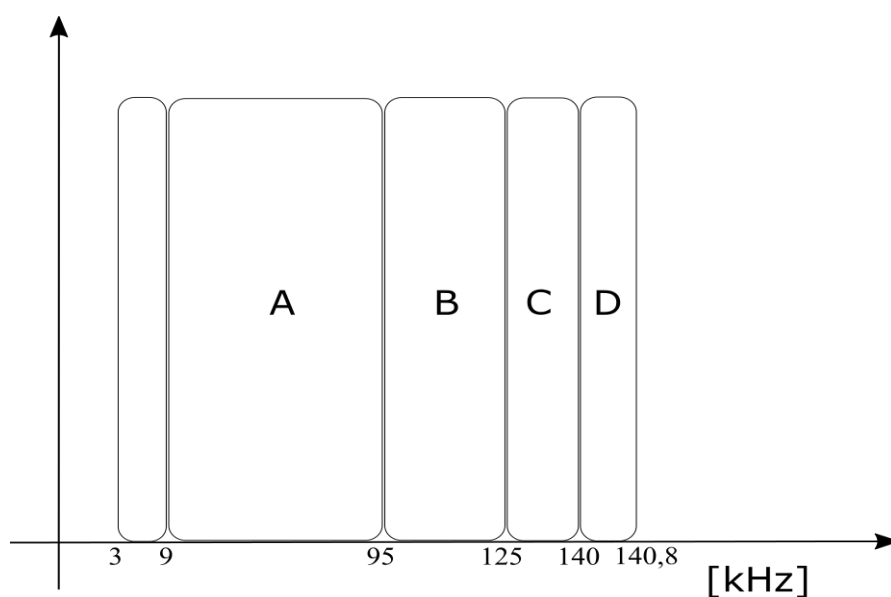
U všech druhů komunikace bohužel existují nedostatky sítě, které se projevují jako rušení signálu tekoucím po mediu. PLC komunikace není žádnou výjimkou a je to hlavně zapříčiněno tím, že elektrické napájecí sítě nebyly pro tento druh komunikace vyrobeny. Mohou vznikat přeslechy signálu, útlum signálu, atd. Nejvíce se tyto nedostatky sítě projevují ve vysokých kmitočtech. Dalším problémem jsou ostatní spotřebiče, které jsou připojené do sítě, kudy proudí namodulovaná data. Samotné vedení a připojené spotřebiče způsobují různorodost impedancí v sítích. Impedance je induktivního charakteru [2].

### 3. Rozdělení PLC

PLC komunikaci rozdělujeme podle frekvenčního pásma na úzkopásmovou a širokopásmovou.

#### 3.1. Úzkopásmová komunikace

Frekvenční rozsah od 3 do 148,5 kHz je definován Evropskou normou CELENEC EN 50065-1. Tato norma dále rozděluje rozsah do 4 základních pásem (viz Obr. 1).



Obr. 1: Rozložení spektra dle normy CELENEC EN 50065-1 [15]

Tabulka 1: Tabulka pásem dle normy CELENEC EN 50065-1. [9]

Název pásma	Šířka pásma [kHz]	Informace
-	3 - 9	Určeno pro dodavatele
CENELEC A	9 - 95	Po souhlasu dodavatele i pro odběratele
CENELEC B	95 - 125	Pro odběratele
CENELEC C	125 - 140	Pro odběratele, vyžadován protokol o přistoupení k dohodě (ČSN EN 50065)
CENELEC D	140 - 148,5	Pro odběratele

Úzkopásmová komunikace se převážně používá v automatizaci a to kvůli tomu, že přenášená data jsou relativně malá a nevyžadují velkou přenosovou rychlost. Používá se např. k ovládání vrat, regulace teploty, vlhkosti, dálkové odečítání z elektroměrů, atd. Přenosová rychlost úzkopásmové komunikace se pohybuje v rozmezí jednotek až stovek kbit/s [1].

### **3.1.1. Historie úzkopásmové komunikace**

V prvních nasazeních byly obsaženy Ultra Narrow Band PLC (UNB-PLC) technologie jako třeba Turtle System a Two-Way Automatic Communications System (TWACS). Oba systémy používaly rušení průběhu napětí pro odchozí komunikaci i průběhu proudu pro příchozí komunikaci.

- Turtle System byl většinou používán pro automatické odečítání z elektroměrů (AMR) jako první volitelný produkt umožňoval pouze jednocestné příchozí připojení. Dvoucestná verze byla dostupná po roce 2002.
- TWACS je široce používán v USA pro Advanced Metering Infrastructure (AMI). AMI je vyspělejší systém odečítání, analýzy a odesílání dat z elektroměrů. Je velice dynamický v tom, že paralelně dokáže zpracovávat stovky elektroměrů. Využívá, Code Division Multiple Access (CDMA), což je vícenásobný přístup k mediu s kódovým dělením.

Jeden z prvních ratifikovaných nízko rychlostních standardů pro úzkopásmovou komunikaci byl ANSI/EIA 709.1 také známý pod názvem LonWorks. Vydán firmou ANSI v roce 1999 a stal se mezinárodním standardem v roce 2008. Tento standart umožňoval odeslání zprávy přes koncový uzel sítě bez nutnosti znalosti její topologie nebo funkčnosti přijímacího zařízení. Pro průmyslové využití je používáno pásmo CENELEC A a pro domácí využití se využívá C pásmo. Dnes nejvíce rozšířené PLC technologie jsou založeny na kmitočtovém klíčování (FSK) nebo Spread-FSK, které jsou specifikované v IEC 61334-5-2 a IEC 61334-5-1 standardech.

V dnešní době je rostoucí zájem o vysokorychlostní standardy fungující ve všech světových pásmech. Velice významné standardy jsou PRIME, G3-PLC, ITU-T G.hnem a IEEE 1901.2 [10].

### **3.2. Širokopásmová komunikace**

Širokopásmová komunikace pracuje ve frekvenčním pásmu 1 – 30 MHz. Maximální přenosová rychlost se pohybuje v řádech stovek Mbit/s (cca 200 Mbit/s), ale pro dosažení této rychlosti je nutné použít složitějších modulací. Širokopásmová komunikace se používá především ke zprostředkování internetového připojení. Více tato oblast komunikace nebude popisována, neboť není zadáním této práce [1].

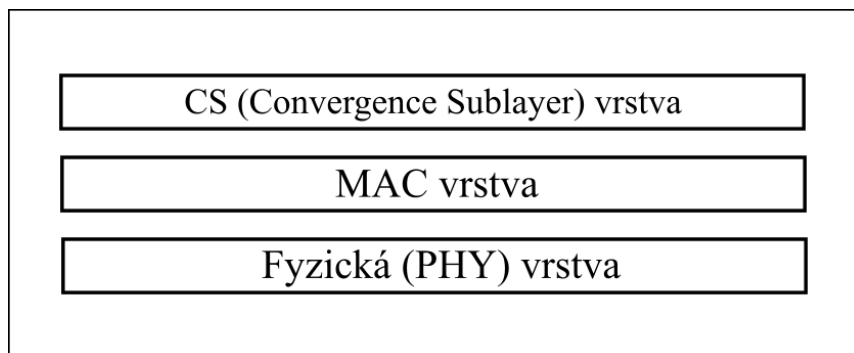
## 4. Standardy

Pro správnou funkčnost PLC komunikace byly vyvinuty různými firmami a organizacemi standardy pro komunikaci po elektrické síti.

### 4.1. PRIME

Tento standard byl vytvořen firmou Iberdola a je vyvíjen PRIME ALIANCE. PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution) je založen na OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) multiplexingu v CENELEC-A pásmu a dosahuje rychlosti až 130 kbps.

PRIME definuje nižší vrstvy úzkopásmové PLC komunikace po elektrické síti. Celkový systém byl navržen s cílem nízké ceny a vysoké výkonnosti. Na obrázku 2 můžeme vidět skladbu vrstev, která je založena na IEEE Stb. 802.16 protokolovém vrstvení.



Obr. 2: Vrstvový model standardu PRIME [3]

- CS (Convergence Sublayer) vrstva klasifikuje přenášená data podle jejich příslušného Media Access Control (MAC) spojení. Tato vrstva provádí jakýkoliv typ mapování přenášených dat, aby byly součástí Service data unit (SDU). Vrstva může také obsahovat funkci komprese hlaviček přenášených dat. Může také existovat několik CS vrstev pro přizpůsobení různých přenášených dat pro SDU.
- MAC vrstva provádí přístup systému ke sdílenému médiu, rozdělení pásma, kontrolu spojení a zjišťování topologie. Byla definována pro spojení typu Master-Slave a optimalizována pro nízkonapětové prostředí.



- Fyzická (PHY) vrstva vysílá a přijímá Protocol data unit (PDU) mezi sousedícími uzly. Je založena na OFDM multiplexingu v CENELEC A pásmu a dosahuje rychlosti přenosu dat 130 kbps [3].

#### **4.1.1. Architektura systému**

PRIME systém je založen na podsítích a každá z nich je definována v rámci trafostanice. Pod síť je stromová struktura o dvou typech uzlu, základní a servisní uzel.

- Základní uzel (Base Node) je na špici stromové struktury a chová se jako master uzel, který zajišťuje konektivitu podsítě. Spravuje zdroje podsítě a její spojení. Je pouze jeden základní uzel v podsíti.
- Servisní uzel (Service Node) může být okrajová část podsítě nebo její vnitřní část. Jakýkoliv jiný uzel podsítě je servisní. Mění svůj stav dynamicky z Terminal (komunikuje, ale nepřepíná) na Switch (vykonává všechny funkce stavu Terminal a také předává data) [3].

## **4.2. G3-PLC**

Standard G3-PLC je založen na podobné technologii jako standard PRIME. Tento standard byl vyvinut a je stále podporován G3-PLC Alliance. Byl vyvinut s předpoklady vysoké rychlosti, vysoké spolehlivosti a dalekonosné komunikace po existujících sítích. Funguje ve třech různých kmitočtových pásmech od FCC (Severní Amerika 10-490kHz), ARIB (Asie 10-450kHz) a CENELEC (Evropa 3-148,5kHz). Může dosahovat až rychlosti 300 kbps.

Na obrázku 3 je zobrazena skladba vrstev pro G3 standart.



Obr. 3: Vrstvový model standardu G3-PLC [7]

- Fyzická vrstva podporuje mezinárodně uznávaná pásma od 10kHz – 490kHz (FCC, CENELEC, ARIB). Mnohovrstvé samoopravné kódování a dekódování (Viterbi, Convolution, Reed Solomon a CRC16). Využívá modulace typu 8PSK, QPSK, BPSK, Robo.
- Aplikační vrstva vyhovuje ANSI C12.19/c12.22, IEC 62056-61/62 (DLMS/COSEM) i jiným světovým standardům.
- Transportní a síťová vrstva podporuje internet protokol verze šest (IPv6), který pak umožňuje potenciální služby jako: SNMP, TFPT, atd.
- MAC vrstva obsahuje program pro vybrání (Plug and play) „nejlepší cesty“ (trasy kudy povede datová komunikace). Obsahuje správce kolizí a časové oblasti [7].

### 4.3. IEEE P1901.2

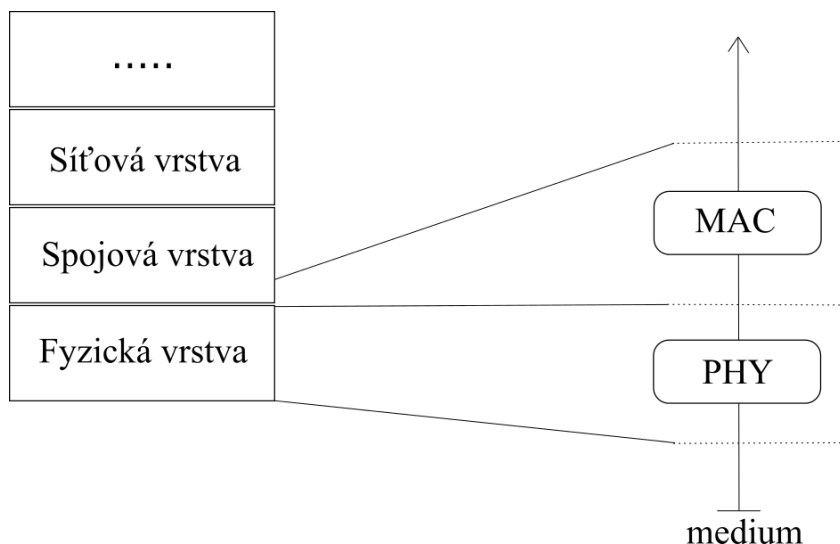
Pracovní skupina IEEE 1901 byla založena v roce 2005 pro sjednocení PL (Power Line) technologií s cílem vyvinout standard s vysokou rychlostí a vysokou spolehlivostí. V roce 2009 začal vývoj standardu IEEE P1901.2 a v roce 2010 došlo k jeho schválení. Tento standard specifikuje komunikaci na nízké frekvenci (méně než 500 kHz). Podporuje vnitřní a venkovní komunikaci přes nízké napětí (cesta mezi transformátorem a metrem méně než 1000 V), přes nízkonapěťový transformátor do vysokonapěťových

transformátorů (1000 V až 72 kV) a přes vysokonapěťový transformátor do nízkonapěťového k městským a venkovním domům [13].

Charakteristické vlastnosti [14]:

- Standard je založen na OFDM
- Frekvenční pásmo 10 – 490 kHz
- Maximální rychlost až 500 kbps
- Nízká spotřeba
- Fungování na AC a AD elektrických sítích
- Nízká cena
- Podpora IPv6

Na obrázku 4 je zobrazen vrstvý model IEEE P1901.2 standardu.



Obr. 4: Vrstvý model IEEE P1901.2 standardu [14]

#### **MAC:**

- Je specifikována standardem IEEE 802.15.4-2006
- Využívá jako přístup ke sdílenému médiu metodu CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), u které se nezjišťuje výskyt kolizí

#### **PHY:**

- Využívá diferenciální modulace typu DBPSK, DQPSK, a D8PSK a koherentní BPSK, QPSK, 8PSK a 16-QAM
- Pro kódování FEC používá Reed-Solomon a konvoluční kódy
- Vzorkovací frekvence jsou 0,4 a 1,2 MHz

## 4.4. ITU-T G.hnem

ITU-T je založeno na doporučení, která určují jejich využitelnost v daném kmitočtovém pásmu:

- Širokopásmový standart G.hn skládající se z doporučení G.9960, G.9961, G.9972
- Úzkopásmový standart G.hnem skládající se z doporučení (G.9955 – popisující fyzickou vrstvu a G.9956 – popisující spojovou vrstvu pro OFDM)
- Bezdrátový úzkopásmový standart G.wnb

ITU-T v roce 2010 započal výzkum projektu G.hnem, v únoru 2011 byl vydán souhlas ke schválení a téhož roku byl v prosinci schválen.

G.hnem doporučení jsou založena na G3-PLC a PRIME, které jsou oba testované v terénu. Tyto technologie jsou klasifikovány jako úzkopásmové vysokorychlostní PLC využívající OFDM. Může dosahovat rychlosti přenosu dat až 1Mbps.

G.9955 popisuje fyzickou vrstvu a definuje její parametry. Hlavní funkce fyzické vrstvy jsou: tvorba rámců a modulování OFDM symbolů.

G.9956 popisuje spojovou vrstvu a definuje její parametry. Vytváří MPDU (MAC Protocol Data Units) v rámci vyšších vrstev, které mohou být IPv6 nebo IPv6 6LoW-PAN komprimovány. G.hnem také podporuje QoS (Quality of Service), které klasifikuje rámce do čtyř různých priorit. Nejvyšší priorita by měla být používána pouze pro naléhavá data.

Zabezpečení se provádí šifrováním komunikačních rámců. Šifrovací metoda je založena na AES (Advanced Encryption Standard) [17].

### 4.4.1. Architektura G.hnem

Síť G.hnem je rozdělena na jednu nebo více domén. Doména je logická skupina uzlů, a proto se mohou fyzicky, celkově nebo částečně překrývat. Domény jsou identifikovány 16bitovým kódem (Domain ID), který je jedinečný v síti. G.hnem síť může obsahovat cizí domény, které mohou být připojeny do sítě skrze most (bridge). Může obsahovat až 65 535 domén a každá doména může obsahovat 32 768 uzlů. Každý uzel je také identifikován 16bitovým kódem (Node ID) uvnitř domény.

V G.hnem síti mohou mít uzly žádnou, jednu nebo více funkcí:

- Global Master (GM): každá síť má GM, který koordinuje operace, zdroje, priority a provozní vlastnosti různých domén
- Domain Master (DM): každá doména bude obsahovat DM, který spravuje a koordinuje operace všech uzlů v dané doméně. Není nutno, aby všechny domény byly DM, ale je zapotřebí, aby byla aspoň jedna
- Inter-DomainBridge (IDB): IDB uzly umožňují komunikaci mezi uzly různých domén ve stejné síti
- Layer 3 Bridge (L3 Bridge): funkčnost tohoto mostu je spojování cizí domény a G.hnem domény a koordinovat jejich komunikaci, aby se navzájem nerušily
- Relay node: tyto uzly jsou využívány, když přímé navázání komunikace mezi dvěma uzly není možné
- Domain Access Point (DAP): tento typ uzlu není povinný v doméně. Nalézá se pouze v doméně, která pracuje v centralizované komunikaci. Získává rámce ze všech uzlů v doméně a směruje je do předurčených destinací.

V G.hnem síti mohou uzly komunikovat přímo nebo prostřednictvím jiného. Tento standard definuje tři typy komunikace:

- Peer-to-peer (P2P): uzly komunikují navzájem
- Centralized Mode (CM): tento typ komunikace vyžaduje DAP, pokud uzel chce komunikovat, musí skrze centrální uzel (DAP)
- Unified Mode (UM): uzly mohou komunikovat přímo nebo prostřednictvím ostatních [17]

## 4.5. PLC kity

V této kapitole jsou uvedeny PLC kity, které podporují uvedené standardy. Celkově existuje mnohem více kitů, ale tyto jsou nejrozšířenější.

- **EnVer EVM8K Evaluation kits** od firmy EnVer [4]
  - Podporuje PRIME a G3-PLC standardy.
  - Podporuje i komunikaci jedné nosné S-FSK.
  - Pásmo: CENELEC, FCC, ARIB
  - Verze 1 umožňuje i třífázovou komunikaci.

- **ATPL230A Evaluation kit a ATSAM4CP16B Evaluation kit** od firmy Atmel [5]
  - Podporují PRIME standard.
  - Frekvenční pásmo do 500 kHz.
  - Komerčně jsou dostupné a cena se pohybuje okolo 500 USD.
- **ATPL250A Evaluation kit a ATSAM4CP16C Evaluation kit** od firmy Atmel [5]
  - Podporují G3-PLC standard.
  - Frekvenční pásmo do 500 kHz.
  - Komerčně jsou dostupné a cena se pohybuje okolo 500 USD.
- **C2000 Power Line Modem Developer's kit** (v3 a v4) od firmy Texas Instruments [6]
  - Verze 3 podporuje standardy PRIME a G3-PLC.
  - Verze 4 pro CENELEC pásmo podporuje standardy PRIME a G3-PLC.
  - Verze 4 pro ARIB pásmo podporuje navíc i standard IEEE P1901.2.
  - Podrobněji jsou tyto kity popsány v experimentálních měřeních (viz 6).
  - Obě verze jsou komerčně dostupné a cena se pohybuje 500 – 600 USD.
- **Cool Phoenix 2 Evaluation kit** od firmy RENESAS [11]
  - Podporuje standardy PRIME a G3-PLC.
  - Pásmo: CENELEC, FCC, ARIB
- **MAX2992 Evaluation kit** od firmy Maxim Integrated [12]
  - Podporuje standardy G3-PLC a IEEE P1901.2
  - Pásmo: CENELEC, FCC, ARIB
  - Komunikační rychlost v ideálních podmínkách dosahuje až 300 kbps.
- **Budoucí kit pro čip SM2480** od firmy Semitech Semiconductor [16]
  - Tento kit s čipem SM2480 by měl podporovat všechny výše popsané standardy i komunikaci jedné nosné S-FSK.
- **Budoucí čip IT1000** od firmy Yitran [36]
  - Měl by podporovat všechny výše popsané standardy.

## 5. Porovnání standardů

Tabulka 2 uvádí základní parametry čtyř standardů, každý parametr je dále rozdělen dle kmitočtového pásma.

Tabulka 2: Parametry standardů PRIME, G3-PLC, IEEE P1901.2 a G.Hnem [19]

Parametr	Pásmo	PRIME	G3-PLC	IEEE P1901.2	G.hnem
Maximální rychlost přenosu dat	CEN A	123 kbps	45 kbps	52 kbps	103 kbps
	FCC	/	207 kbps	500 kbps	821 kbps
Frekvenční pásmo	CEN A	42-89 kHz	36-90 kHz	36 – 90 kHz	36 – 90 kHz
	FCC	/	159 – 478 kHz	36 – 487 kHz	35 – 478 kHz
Vzorkovací frekvence	CEN A	250 kHz	400 kHz	400 kHz	200 kHz
	FCC		1,2 MHz	1,2 MHz	800 kHz
Modulace		DBPSK, DQPSK, D8PSK	DBPSK, DQPSK, D8PSK, Robo	Koherentní: BPSK, QPSK, 8PSK, 16-QAM Diferenciální: DBPSK, DQPSK, D8PSK	BPSK, QPSK, 16-QAM
Délka OFDM	CEN A	2240 $\mu$ s	695 $\mu$ s	695 $\mu$ s	700/760 $\mu$ s
	FCC	/	231,7 $\mu$ s	231,7 $\mu$ s	350/380 $\mu$ s
Délka FFT	CEN A	512	256	256	256
	FCC	/	256	256	512
Rozestup nosných	CEN A	488 Hz	1,5625 kHz	1,5625 kHz	1,5625 kHz
	FCC	/	4,6875 kHz	4,6875 kHz	3,125 kHz
FEC		Konvoluční kódy	Reed Solomon, Konvoluční kódy	Reed Solomon, Konvoluční kódy	Reed Solomon, Konvoluční kódy
Velikost okna	CEN A	0	8	8	8
	FCC	/	8	8	16
Cyclic Prefix (Trvání)	CEN A	48(192 $\mu$ s)	30(75 $\mu$ s)	30(75 $\mu$ s)	20/32(100/160 $\mu$ s)
	FCC	/	30(25 $\mu$ s)	30(25 $\mu$ s)	40/64(50/80 $\mu$ s)

## 5.1. Terénní měření standardů

Tabulka 3 popisuje terénní měření, které bylo provedeno G3-PLC Alliance se standardem G3-PLC. Bylo měřeno ve dvou různých hodnotách napájecího napětí VN (vysoké napětí do 52 kV) a NN (nízkého napětí do 1000 V). Největší rychlosti bylo dosaženo v ARIB pásmu (Japonské pásmo pro PLC komunikaci 10 kHz až 450 kHz) až 100 kbps.

V tabulce 4 můžeme vidět rychlosti přenosu dat v G3-PLC pomocí různých typů modulací. Z tabulky lze vyčíst, že nejvyšší rychlosti přenosu dosahuje modulace D8PSK (diferenciální 8 - stavové fázové klíčování) až 300 kbps.

Parametry na fyzické vrstvě standardu PRIME popisuje tabulka 5, ve které můžeme vidět, že modulace D8PSK dosahuje rychlosti až 128 kbps s vypnutým FEC.

G3-PLC:

Tabulka 3: Terénní měření standardů G3 v různých pásmech [7]

Vzdálenost	Cesta	Pásmo	Rychlost	Modulace	FER (Frame error rate)
6,4 km	VV-VV	CENELEC	6,092 kbps	8PSK	0 %
2,8 km	VN-NN-VN	CENELEC	4,175 kbps	8PSK	1 %
1,8 km	VN	FCC	54 kbps	BPSK	/
1,8 km	NN	FCC	48 kbps	BPSK	/
150 m	NN	ARIB	100 kbps	/	/
155 m	NN	ARIB	100 kbps	/	/
220 m	NN	ARIB	100 kbps	/	/
200 m	NN	ARIB	96 kbps	/	/

Tabulka 4: Naměřené rychlosti přenosu na různých modulacích a pásmech [7]

Pásmo	Robo [kbps]	DBPSK [kbps]	DQPSK [kbps]	D8PSK [kbps]	Max D8PSK [kbps]
36–91 kHz	4,5	14,640	29,285	43,928	46,044
150–487,5 kHz	21	62,287	124,575	186,863	234,321
10–487,5 kHz	38	75,152	150,304	225,157	298,224



PRIME:

Tabulka 5: Parametry na fyzické vrstvě standardu PRIME [20]

/	DBPSK		DQPSK		D8PSK	
Konvoluční kód	on	off	on	off	on	off
Informační bity po subpásmu	0.5	1	1	2	1.5	3
Informační bity po OFDM	48	96	96	192	144	288
Hrubá rychlost přenosu [kbps]	21.4	42.9	42.9	85.7	64.3	128.6

## 6. PLC komunikační modemy TMDSPCKIT

Pro testování byly použity měřicí kity C2000 Power Line Modem Developer's Kit, které se skládají ze dvou modemů TMDSPCKIT-V3 (viz Obr. 5) a TMDSPCKIT-V4 (viz Obr. 6) od firmy Texas Instruments.



Obr. 5: Měřicí modem TMDSPCKIT-V3 [21]



Obr. 6: Měřicí modem TMDSPCKIT-V4 [27]

Modemy jsou vybaveny rozhraním pro komunikaci elektrickým vedením 230V/50Hz a sériovým rozhraním RS232 (TMDSPCKIT-V3) pro diagnostiku. Pro konfiguraci a zjišťování parametrů zařízení se využívá rozhraní USB 2.0 Typu B.

Součástí je softwarové prostředí ZERO Configuration GUI pro konfiguraci a komunikaci s modemy.

## 6.1. Prostředí ZERO Configuration GUI

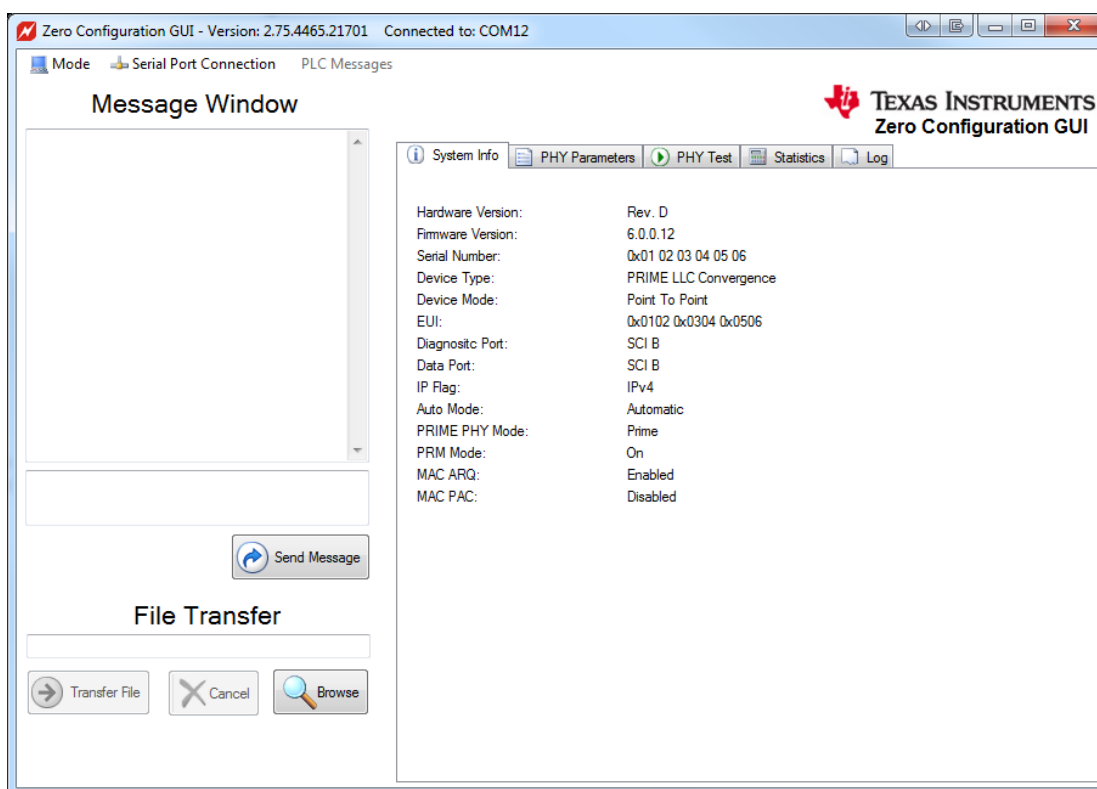
ZERO Configuration GUI je konfigurační prostředí, které je součástí balení C2000 Power Line Modem Developer's Kit a slouží pro konfiguraci parametrů modemů a jejich grafické sledování při komunikaci.

Prostředí má dva obslužné mody:

- Zero Configuration Mode
- Intermediate Mode

### 6.1.1. Zero Configuration Mode

Je to jednoduché rozhraní pro sledování statistik, nastavování modulací, nastavování testu, posílání zpráv, posílání souboru, atd.



Obr. 7: Ukázka rozhraní Zero Configuration mode [22]

**Panely:**

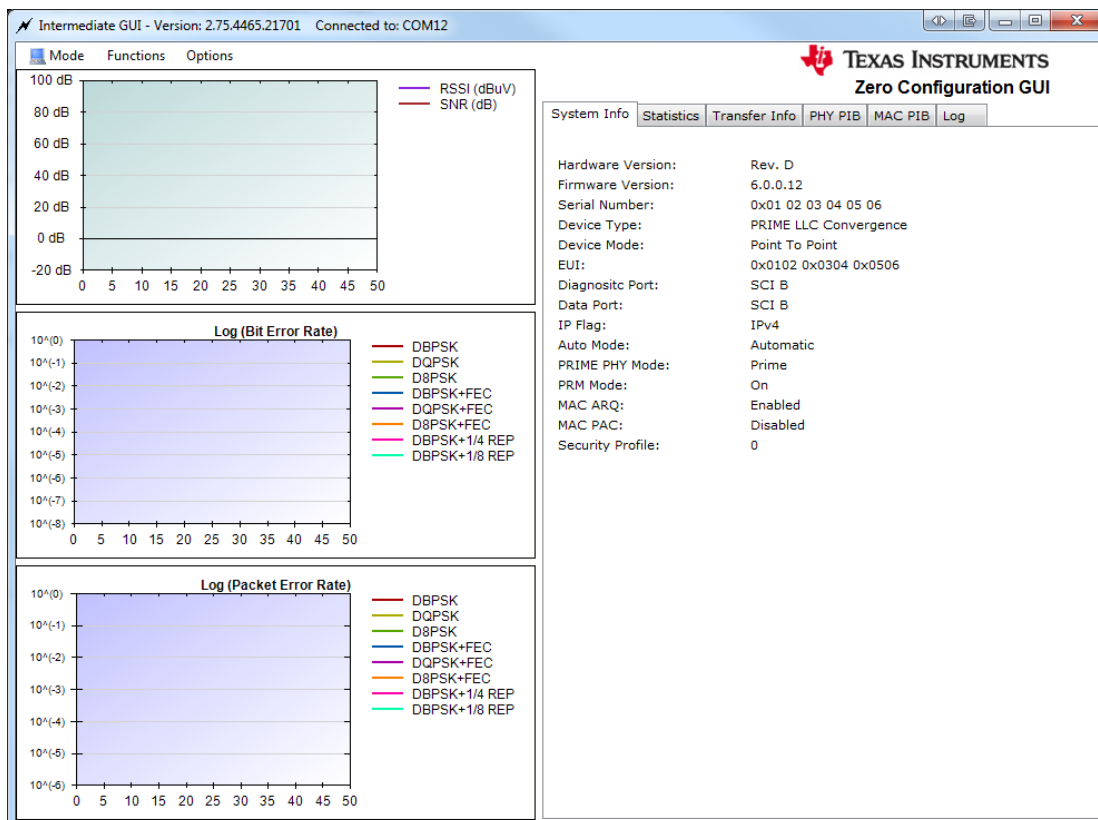
- **Systém Info:** Zobrazuje informace o připojeném modemu, jeho verzi firmwaru a aktuální konfiguraci.
- **PHY Params:** Panel zobrazuje nastavení RX (Receiver) a TX (Transmitter) parametrů a možnost změny modulačního schématu.
- **PHY Test:** Umožňuje spuštění testu, kdy se PHY pakety posílají směrem k druhému modemu pro otestování komunikace. Jeden modem je nutno nastavit jako přijímač a druhý jako vysílač paketů.
- **Statistics:** Zobrazuje informace o přenosu zpráv a souborů. Červeně označené znamenají, že se informace změnily.
- **Log:** Vypisuje všechny parametry přenosu. Může mít pouze 10 000 znaků, pak se panel obnovuje kvůli omezené paměti.

### **6.1.2. Intermediate Mode**

Intermediate Mode je rozšířená verze Zero Configuration mode s mnohem více možnostmi nastavení a grafickým sledováním přenosu.

**Grafy:**

- **RSSI/SNR graf:** Vykresluje kvalitu signálu v čase na vedení. SNR (Signal to Noise Ratio) je odstup signálu od šumu, který se udává v [dB] (decibelech) a znamená, že čím je větší hodnota SNR, tím je lepší přenos. Pokud je hodnota SNR nízká (0-20 dB), tak je přenos rušen. RSSI (Received Signal Strength Indication) je hodnota síly přijatého signálu. Udává se v [dBμV] (decibelu na mikrovolt) [24].
- **Log (Bit Error Rate):** Tento graf zobrazuje, BER (Bit Error Rate), poměr chybně přenesených bitů k počtu všech přenášených bitů pro různé modulační schémata s funkcí FEC [25].
- **Log (Packet Error Rate):** Tento graf zobrazuje PER (Packet Error Rate), poměr chybných paketů k celkovému počtu přenesených paketů. Pro různé modulační schémata s funkcí FEC [26].



Obr. 8: Ukázka rozhraní Intermediate mode [22]

### Panely:

- Transfer Info: Zobrazuje informace o odeslaných a přijatých datech.
- PHY PIB: Zobrazuje parametry na fyzické vrstvě.
- MAC PIB: Zobrazuje parametry na MAC vrstvě.

## **7. Experimentální měření PLC modemu**

### **TMDSPLCKIT-V3**

Byl proveden experiment, při kterém byly změřeny přenosové vlastnosti standardů PRIME a G3-PLC v domácím prostředí. Trasa byla dlouhá cca 20 m a zásuvky byly zapojeny do jednoho okruhu. V okruhu během experimentu byly zapojeny dva notebooky o výkonu cca 30 W.

#### **7.1. Nastavení přenosových parametrů a popis testu**

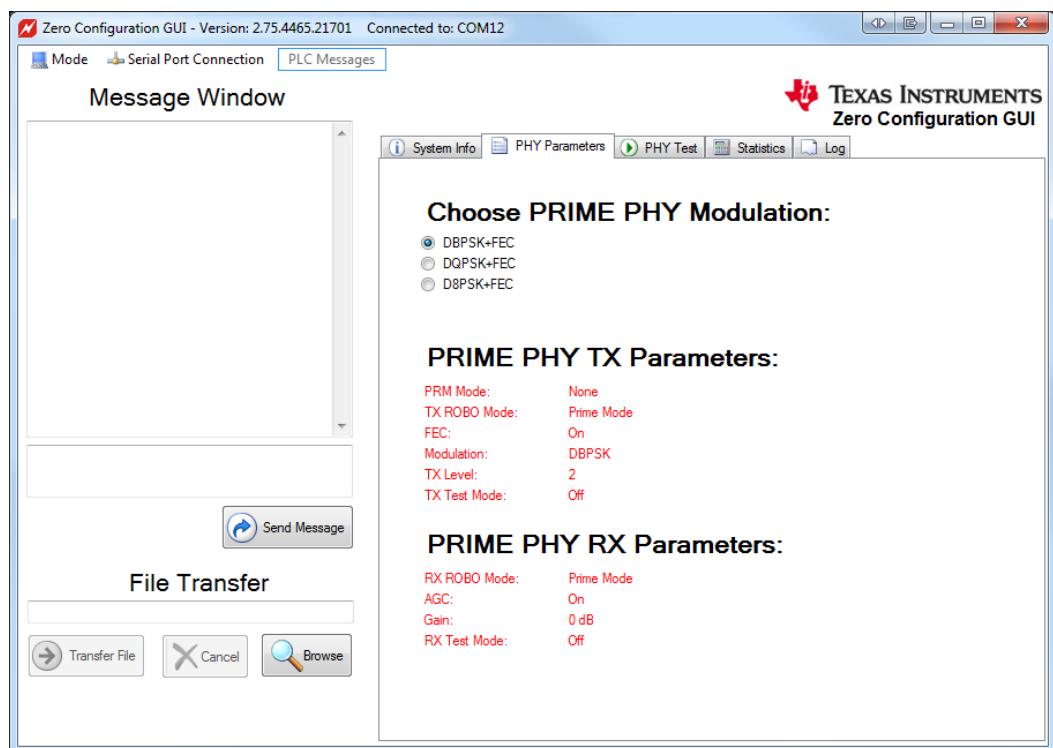
V tomto textu jsou popsány možnosti nastavení parametrů a popis testů pro jednotlivé standardy. Byla použita verze programu ZERO Configuration GUI (v2.90). Pro měření standardu PRIME byl použit již přednastavený firmware verze 7.7.1.1 a pro měření se standardem G3-PLC bylo nutné přehrát firmware (verze 6.0.1.0.).

##### **Provedené testy:**

- PHY test
- Přenos souboru
- Testování provozu

##### **7.1.1. PHY test**

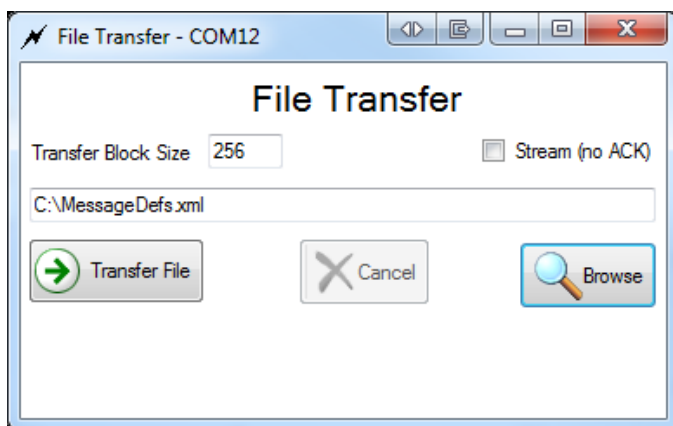
V Zero Configure Mode byly provedeny pouze PHY testy, při kterých byly v záložce PHY Params (viz Obr. 9) měněny přednastavené modulační parametry, a to jak pro PRIME standard tak pro G3-PLC standard. PHY test prověřuje rychlost přenosu na fyzické vrstvě tzn., že komunikace neprochází celou vrstevnou strukturou. V panelu PHY test je nastavení přijímače, vysílače a zobrazení rychlosti. Jeden modem bude posílat PHY pakety a druhý je bude přijímat.



Obr. 9: Možnosti nastavení PHY testu [22]

### 7.1.2. Přenos souboru

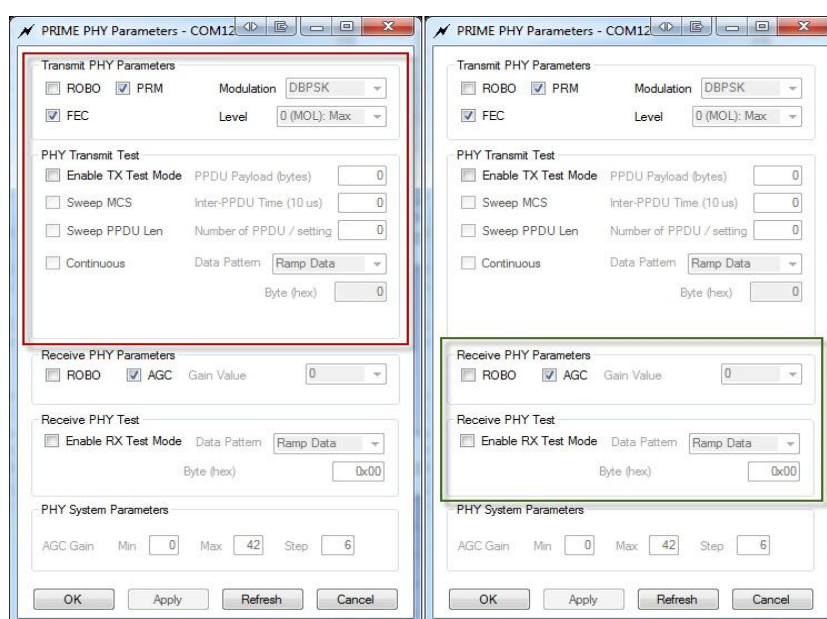
Pro přenos souboru se softwarové prostředí přepnulo do Intermediate Mode. Přenos souboru naopak od PHY testu prověřuje rychlost na aplikační vrstvě tzn., že komunikace je vedena skrze celou vrstvou strukturu. Na obrázku 10 je zobrazeno okno, pomocí kterého se posílaly soubory (Menu->Function->Send File).



Obr. 10: Okno pro posílání souboru mezi modemy [22]

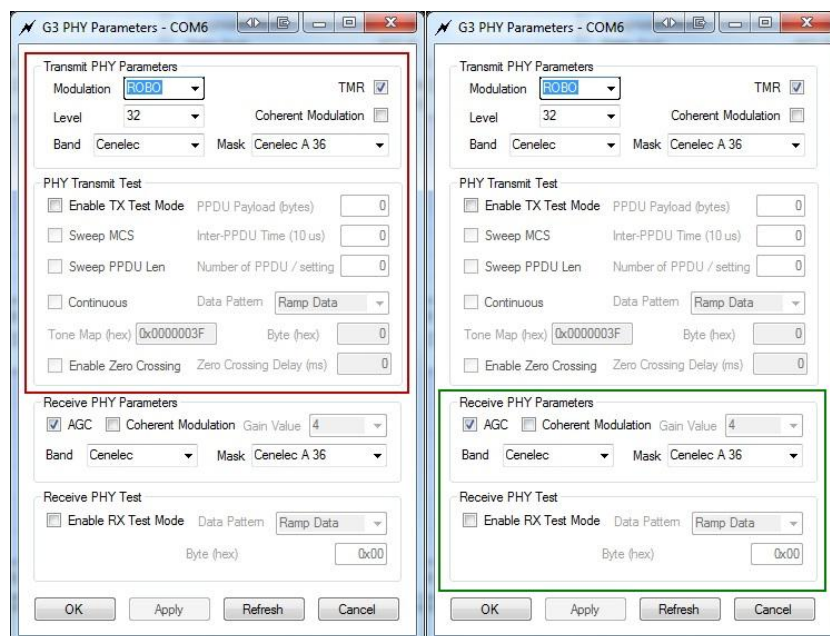
### 7.1.3. Testování provozu

Pro testování provozu byl opět použit Intermediate Mode. Zde byly nastavovány fyzické parametry. Testování provozu je opětovné testování komunikace na fyzické vrstvě, ale s možností vlastní konfigurace přenosových parametrů. V záložce (Menu->Options->PHY parameters) mohly být nastavovány parametry vysílače a parametry přijímače pro testování provozu. Možnosti nastavení se u obou standardů lišily. U PRIME standardu byla možnost ROBO režimu u každé modulace (viz Obr. 11) a pro G3-PLC standart byl ROBO režim považován jako samostatná modulace (viz Obr. 12).



Obr. 11: Možnosti nastavení PHY parametrů PRIME (zeleně přijímač a červeně vysílač) [22]





Obr. 12: Možnosti nastavení PHY parametrů G3-PLC (zeleně přijímač a červeně vysílač) [22]

## 7.2. Výsledky měření rychlosti PLC modemů

Výsledky jednotlivých měření rychlosti přenosu a kvality signálu.

### 7.2.1. PRIME

Tabulka 6 zobrazuje výsledky PHY testu pro PRIME standard za použití přednastavených modulací.

Tabulka 6: Výsledky PHY testu pro PRIME standard

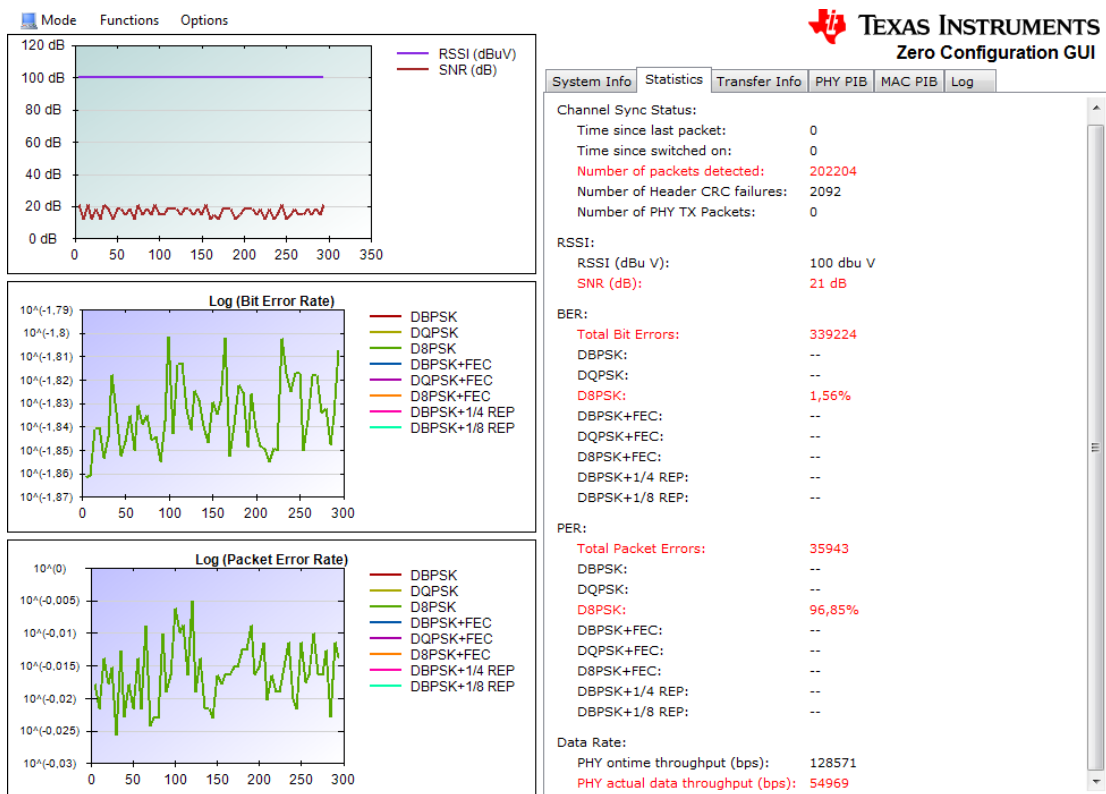
Modulace	DBPSK+FEC	DQPSK+FEC	D8PSK+FEC
Rychlost [kbps]	19,456	35,841	49,152

Tabulka 7 zobrazuje výsledky testu přenosu souboru pro PRIME standard za použití souboru o velikosti 72 kB.

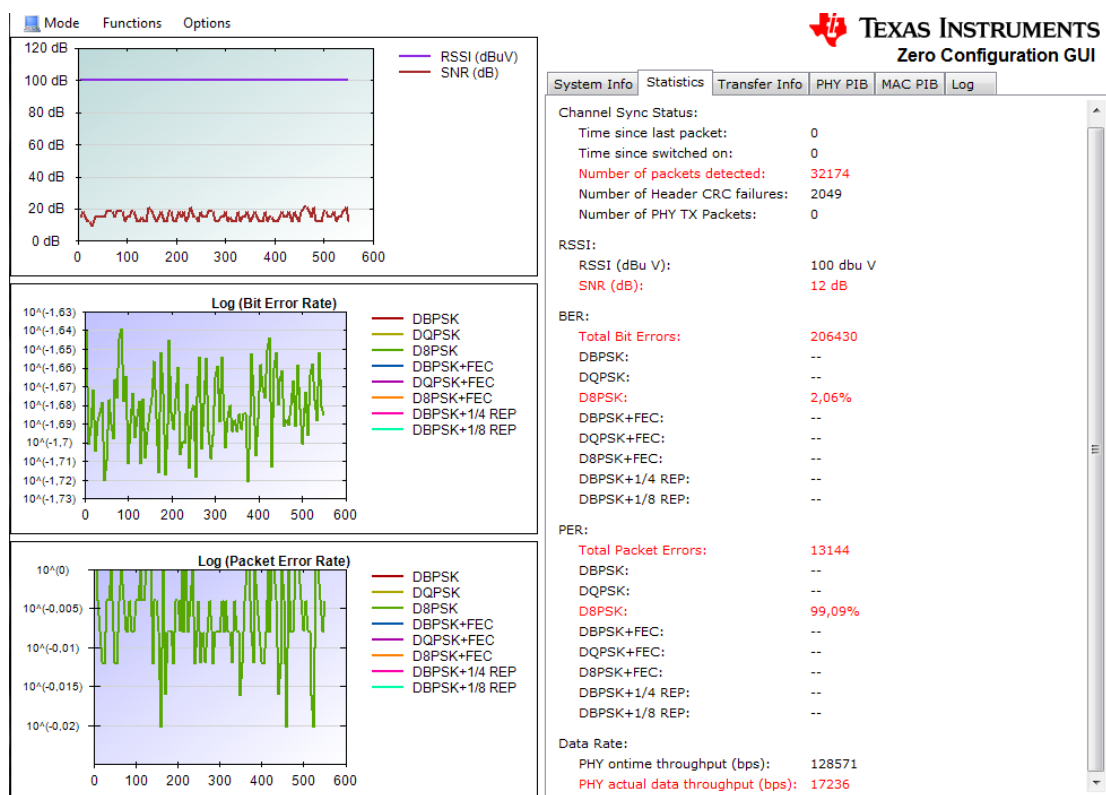
Tabulka 7: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro PRIME standard

<b>Modulace</b>	<b>Rychlost [kbps]</b>
<b>DBPSK</b>	1,385
<b>DQPSK</b>	0,425
<b>D8PSK</b>	-
<b>DBPSK+FEC</b>	1,702
<b>DQPSK+FEC</b>	1,738
<b>D8PSK+FEC</b>	1,776

Při testování provozu byla nastavena hodnota výstupní úrovně na 6 dB a nastavena délka vyslané datové jednotky PPDU Payload na 100 bytes. Všechny nastavené modulace nevykazovaly žádné zahozené bity BER nebo pakety PER. Pouze při modulaci D8PSK a vypnuté FEC (viz Obr. 13) a také v ROBO (Robustní mód), který zvyšuje spolehlivost spojení (viz Obr. 14) lze vidět na grafech průběh chybovosti BER a PER. Při zapnutém ROBO režimu vykazovaly BER chybovost 2,06 % a PER chybovost 99,09 %. Při vypnutém ROBO režimu vykazovaly BER chybovost 1,56 % a PER chybovost 96,85 %.



Obr. 13: Výsledek měření při D8PSK s vypnutým ROBO režimem a vypnutým FEC



Obr. 14: Výsledek měření při D8PSK se zapnutým ROBO režimem a vypnutým FEC

Tabulky 8 a 9 zobrazují výsledky testování provozu pro PRIME standard a to při zapnutém i vypnutém ROBO režimu. U každé modulace je kromě hodnoty rychlosti také odstup signálu od šumu (SNR) a hodnota síly přijatého signálu (RSSI).

Tabulka 8: Výsledky testování provozu při zapnutém ROBO pro PRIME standard

<b>Modulace</b>	<b>DBPSK</b>	<b>DQPSK</b>	<b>D8PSK</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	100
<b>SNR [dB]</b>	9-21	15-21	9-12
<b>Rychlost [kbps]</b>	13,593	15,790	17,236
<b>Modulace</b>	<b>DBPSK+FEC</b>	<b>DQPSK+FEC</b>	<b>D8PSK+FEC</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	100
<b>SNR [dB]</b>	9-21	9-21	15-21
<b>Rychlost [kbps]</b>	10,400	13,440	15,357
<b>Modulace</b>	<b>DBPSK+1/4 REP</b>	<b>DBPSK+1/8 REP</b>	/
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	/
<b>SNR [dB]</b>	9-21	12-20	/
<b>Rychlost [kbps]</b>	4,160	2,400	/

Tabulka 9: Výsledky testování provozu při vypnutém ROBO pro PRIME standard

<b>Modulace</b>	<b>DBPSK</b>	<b>DQPSK</b>	<b>D8PSK</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	100
<b>SNR [dB]</b>	6-21	9-21	9-21
<b>Rychlost [kbps]</b>	28,142	42,495	55,154
<b>Modulace</b>	<b>DBPSK+FEC</b>	<b>DQPSK+FEC</b>	<b>D8PSK+FEC</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	100
<b>SNR [dB]</b>	9-21	9-21	6-21
<b>Rychlost [kbps]</b>	17,440	28,960	38,080

### 7.2.2. G3-PLC

Tabulka 10 zobrazuje výsledky PHY testu pro G3-PLC standard za použití přednastavených modulací.

Tabulka 10: Výsledky PHY testu pro G3-PLC standard

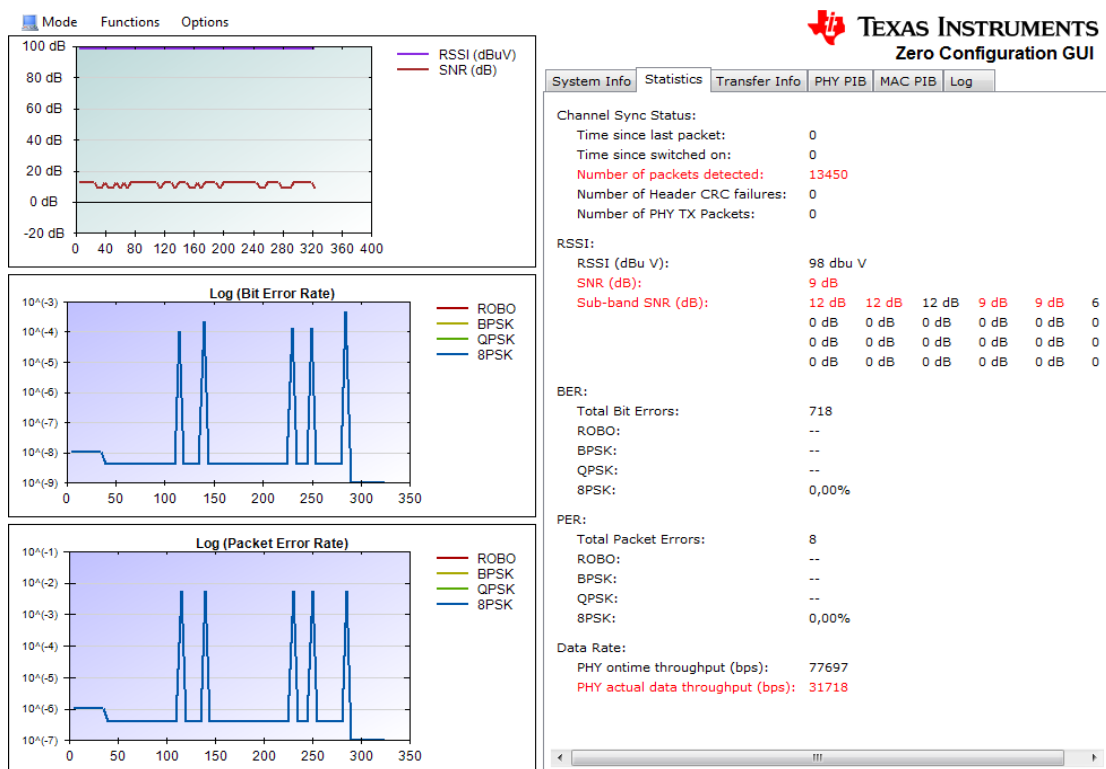
<b>Modulace</b>	<b>ROBO</b>	<b>DQPSK</b>	<b>DBPSK</b>
<b>Rychlost [kbps]</b>	5,632	5,654	17,408

Tabulka 11 zobrazuje výsledky testu přenosu souboru pro G3-PLC standard za použití souboru o velikosti 72 kB.

Tabulka 11: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro G3-PLC standard

<b>Modulace</b>	<b>Rychlost [kbps]</b>
<b>ROBO</b>	2,443
<b>BPSK</b>	4,965
<b>QPSK</b>	5,952
<b>D8PSK</b>	6,207

Délka vyslané datové jednotky byla stejně nastavena jako u PRIME. Zde opět žádné vybrané modulace nevykazovaly chybovost BER a PER, kromě D8PSK (viz Obr. 15), který vykazoval pouze nízkou chybovost.



Obr. 15: Výsledek provozního měření při D8PSK

Tabulka 12 zobrazuje výsledky testování provozu pro G3-PLC standard. Naopak od PRIME standardu, má G3-PLC robustní režim (ROBO) jako samostatnou modulaci. Tato modulace je založena na DBPSK modulaci.

Tabulka 12: Výsledky testování provozu při zapnuté i vypnuté (c) koherentní modulaci pro G3-PLC standard

Modulace	ROBO	BPSK	QPSK
RSSI [dBμV]	98	98	98
SNR [dB]	9-12	9-12	9-12
Rychlost [kbps]	5,332	15,360	24,764
Modulace	D8PSK	ROBO(c)	BPSK(c)
RSSI [dBμV]	98	98	98
SNR [dB]	9-12	6-9	0-6
Rychlost [kbps]	31,718	4,800	14,552

### 7.3. Zhodnocení výsledků

Oba dva standardy G3-PLC a PRIME byly testovány ve třech režimech komunikace: PHY test, přenos souboru a testování provozu.

#### **PHY test:**

Při PHY testu byly použity přednastavené konfigurace modulací s FEC u PRIME (viz Tabulka 6) a tři modulace bez FEC u G3-PLC (viz Tabulka 10). Nejvyšší rychlosti bylo dosaženo u standardu PRIME při použití D8PSK+FEC, který vykazoval rychlost 49,2 kbps, u standardu G3-PLC bylo dosaženo nejvyšší rychlosti u modulace DBPSK, která vykazovala 17,4 kbps. Důvod rozdílů rychlosti u standardu PRIME mezi modulacemi je, že D8PSK je modernější provedení DBPSK (dvoustavové) a DQPSK (čtyřstavové). U D8PSK je využíváno 8 stavů, a tím je možnost přenášení 3 bitů na jeden stav. U G3-PLC je ROBO tzv. robustní mód, který je využíván u PLC komunikace v prostředí s vysokým rušením. Je využíván pro zajištění spolehlivosti spojení, ale na úkor rychlosti přenosu, a proto vykazoval nižší rychlost. Právě DBPSK je sice pomalejší než DQPSK, ale je robustnější.

#### **Přenos souboru:**

Přenos souboru naopak od PHY testu prověřuje rychlost na aplikační vrstvě, a proto také vykazoval nižší rychlosti kvůli celé komunikaci všech vrstev, u PHY testu se prověřuje čistě komunikace na fyzické vrstvě. Nejvyšší rychlost byla naměřena u modulace D8PSK u standardu G3-PLC 6,207 kbps (viz Tabulka 11). U PRIME standardu (viz Tabulka 7) byla naměřena nejvyšší rychlost 1,776 kbps u modulace D8PSK+FEC. D8PSK by vykazovala vyšší rychlost bez FEC, ale z důvodu nízké robustnosti spojení nebylo navázáno.

#### **Testování provozu:**

Testování provozu je opětovné měření rychlosti na fyzické vrstvě s možností vlastního nastavení. Při zapnutém robustním režimu u PRIME standardu (viz Tabulka 8, Tabulka 9) bylo nejvyšší rychlosti dosaženo u D8PSK 17,2 kbps a při vypnutém robustním režimu vykazovala modulace D8PSK rychlost 55,1 kbps. Je zde vidět znatelný rozdíl při použití robustního módu, který sice zajistí spojení a přenos, ale na úkor výrazného snížení rychlosti více než dvojnásobného. Na Obr. 13 a Obr. 14 je vidět chybovost, kterou tato modulace vykazuje na úkor své rychlosti. Standart G3-PLC (viz

Tabulka 12) vykazoval nejvyšší rychlost také u D8PSK s 31,7 kbps. U PRIME standardu lze znatelně pozorovat rozdíl při použití FEC. Rozdíl je cca 2,5-3 kbps při zapnutém robustním režimu pro různé modulace. Při vypnutém robustním režimu se rozdíl pohybuje kolem 11-17 kbps.



## 8. Popis prostředí pro experimentální měření

V této kapitole jsou popisovány vlastnosti prostředí, kde byly vykonávány experimentální měření s PLC modemy TMDSPCKIT-V4 od firmy Texas Instruments, MT39-L1-ver.R modemů od firmy ModemTec a EVALKITST7580-1 od firmy STMicroelectronics.

Měření bylo realizováno v domácím prostředí dvoupatrového rodinného domu se suterénem. Na střeše domu jsou umístěny fotovoltaické panely a v suterénu jsou situovány niklo-kadmiové baterie, kde je uchovávána elektrická energie. Za zdroj rušení lze považovat měnič DC napětí z panelů na AC napětí 230V/50Hz.

### 8.1. Měnič

Měnič je Vertex 3 kW jednofázový od firmy UPC Voltronic Power [38]. K měniči jsou připojeny baterie s nominální hodnotou 48 V. Parametry měniče:

- Příkon: 3000 W
- Maximální vstupní proud: 13 A
- Maximální vstupní napětí: 500 V
- Výstupní napětí: 230/240 V
- Výstupní frekvence: 50/60 Hz
- Výstupní průběh: Čistá sinusoida
- Efektivita: 92 %

Měnič se mohl nacházet ve třech různých režimech:

- **1. režim:** Měnič odebírá elektrickou energii přímo z fotovoltaických panelů a vygenerované elektrické napětí přímo posílá do domácího rozvodu. Během tohoto režimu je elektrická distribuční síť odpojena od domu. Tento režim je možný pouze během slunečného dne.
- **2. režim:** Měnič odebírá nashromážděnou elektrickou energii z baterií a vygenerované elektrické napětí přímo posílá do domácího rozvodu. Během tohoto režimu je také elektrická distribuční síť odpojena od domu.
- **3. režim:** V tomto režimu je měnič nečinný. Nastává, když je nepříznivé počasí a v bateriích je nízké napětí.

Veškerá měření, která byla provedena v rámci experimentů, byla vždy vykonávána v 1. a 2. režimu tzn., že veškeré elektrické napětí v síti bylo uměle vygenerováno pomocí fotovoltaických panelů.

## **8.2. Rozmístění modemů**

Rozmístění modemů bylo pro každé měření vždy totožné. První PLC modem byl umístěn v blízkosti měniče, byl zapojen do elektrické sítě cca 10 m od měniče. Modem byl následně připojen pomocí USB kabelu k počítači s operačním systémem Windows XP. Druhý modem byl umístěn do obytného pokoje prvního patra rodinného domu. Modem byl taktéž připojen USB kabelem k počítači s Windows 7. Délka celkové trasy se pohybuje okolo 60 m. Veškeré napětí v síti 230V/50 V bylo vygenerováno měničem.

## 9. Experimentální měření PLC modemu

### TMDSPLCKIT-V4

Pro nastavování TMDSPLCKIT-V4 byl použit Zero-config GUI (v2.99). Byly použity jiné verze firmwaru pro PRIME standart v7.3.1.6 a pro G3-PLC standart v8.0.1.0.

Byly provedeny stejné konfigurace systému a stejné testy, jak tomu bylo u modemu TMDSPLCKIT-V3 pro možnost porovnání obou kitů.

Prostředí je popsáno v předchozí kapitole (viz 8).

#### 9.1. Výsledky měření rychlosti PLC modemů

Výsledky jednotlivých měření rychlosti přenosu a kvality signálu.

##### 9.1.1. PRIME

Tabulka 13 zobrazuje výsledky PHY testu pro PRIME standard za použití přednastavených modulací.

Tabulka 13: Výsledky PHY testu pro PRIME standard

Modulace	DBPSK+FEC	DQPSK+FEC	D8PSK+FEC
Rychlost [kbps]	0,900-4,000	1,800-5,400	4,000-6,500

Tabulka 14 zobrazuje výsledky testu přenosu souboru pro PRIME standard za použití souboru o velikosti 72 kB.

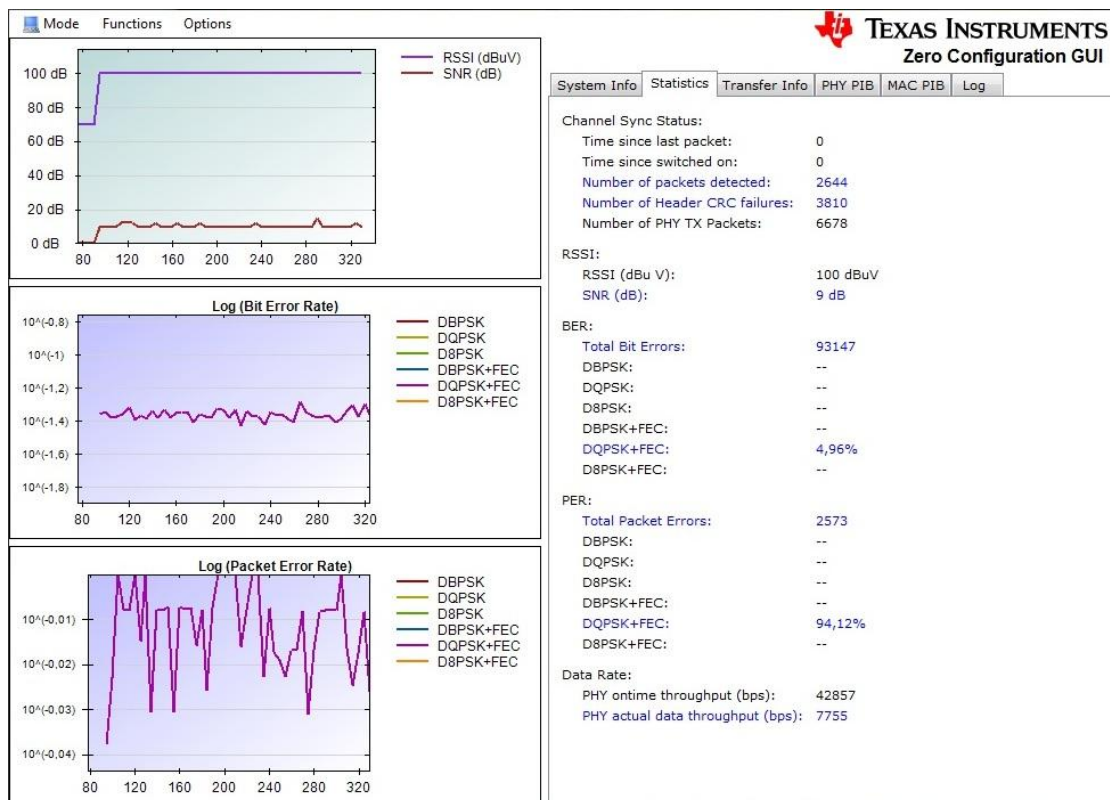
Tabulka 14: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro PRIME standard

Modulace	Rychlost [kbps]
DBPSK	0,920
DQPSK	0
D8PSK	0
DBPSK+FEC	1,130
DQPSK+FEC	1,211
D8PSK+FEC	0

Při testování provozu bylo nastavení stejné jako u měření s TMDSPCKIT-V3. Na rozdíl od předchozí verze TMDSPCKIT-V4 nebyla možnost měřit při zapnutém robustním módu (ROBO). Jediné nastavení, které nevykazovalo chybovosti BER a PER bylo DBPSK+FEC (viz Tabulka 15). Jediné další nastavení, které sice vykazovalo vysokou chybovost PER, ale ne stoprocentní, bylo DQPSK-FEC (viz Obr. 16).

Tabulka 15: Výsledky testování provozu pro PRIME standard

<b>Modulace</b>	<b>DBPSK</b>	<b>DQPSK</b>	<b>D8PSK</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	100
<b>SNR [dB]</b>	6-9	6-9	12
<b>Rychlost [kbps]</b>	1,680-1,841	1,900-2,600	2,290-2,900
<b>PER [%]</b>	100	100	100
<b>BER [%]</b>	4,53	6,3-7,5	10,11-10,4
<b>Modulace</b>	<b>DBPSK+FEC</b>	<b>DQPSK+FEC</b>	<b>D8PSK+FEC</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	100	100	100
<b>SNR [dB]</b>	9-12	9-12	12-15
<b>Rychlost [kbps]</b>	9,920-12,000	8,800-9,000	1,200-2,900
<b>PER [%]</b>	0	95,65-96,15	100
<b>BER [%]</b>	0	4,16-5,24	9-12



Obr. 16: Výsledek provozního měření při DQPSK+FEC

### 9.1.2. G3-PLC

Tabulka 16 zobrazuje výsledky PHY testu pro G3-PLC standard za použití přednastavených modulací.

Tabulka 16: Výsledky PHY testu pro G3-PLC standard

Modulace	ROBO	DBPSK	DQPSK	D8PSK
Rychlost [kbps]	3,500-4,096	10,336-13,056	0-2,328	0

Tabulka 17 zobrazuje výsledky testu přenosu souboru pro G3-PLC standard za použití souboru o velikosti 72 kB.

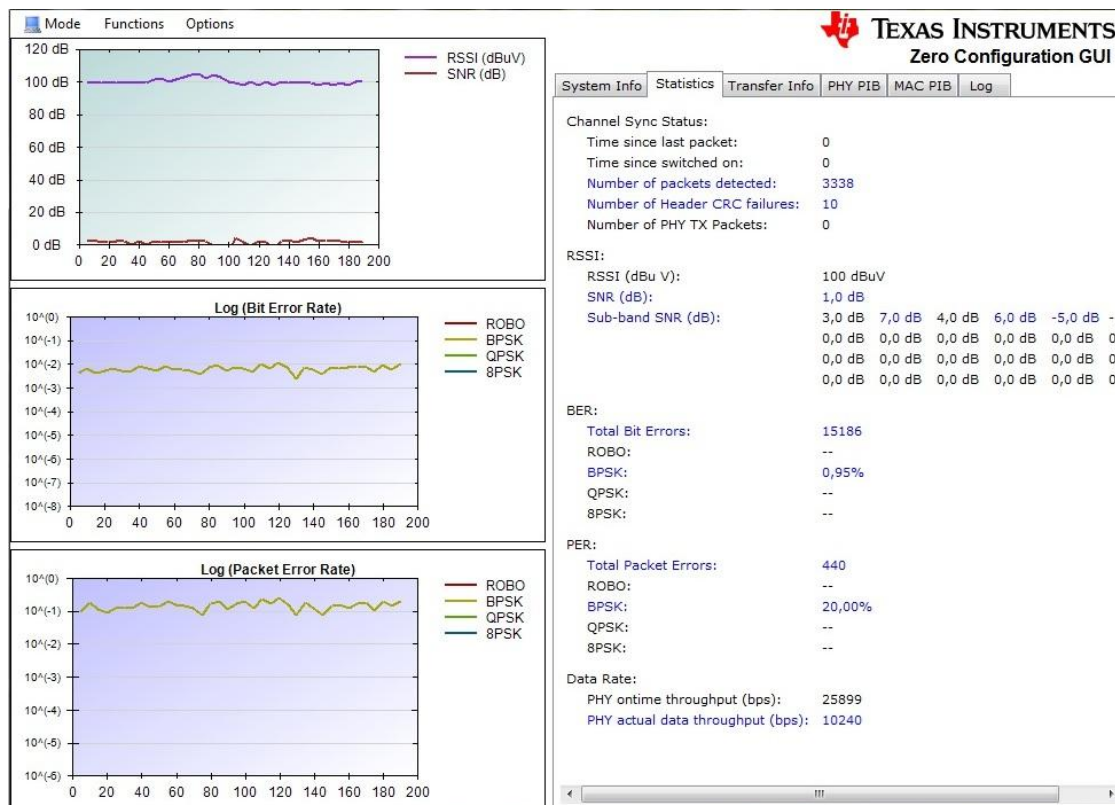
Tabulka 17: Výsledky přenosu souboru 72 kB pro G3-PLC standard

Modulace	Rychlost [kbps]
ROBO	0,523
BPSK	1,364
QPSK	0,967
D8PSK	0

Tabulka 18 zobrazuje výsledky testování provozu pro G3-PLC standard. Nastavení ROBO sice nevykazovalo žádnou chybovost BER a PER, ale rychlost nebyla dostačující. Jediné další nastavení, které bylo dostatečně rychlé a relativně s nízkou chybovostí bylo BPSK (viz Obr. 17).

Tabulka 18: Výsledky testování provozu při zapnuté i vypnuté (c) koherentní modulaci pro G3-PLC standard

<b>Modulace</b>	<b>ROBO</b>	<b>BPSK</b>	<b>QPSK</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	87-96	98-105	99-105
<b>SNR [dB]</b>	0	-3 – 3	0-5
<b>Rychlost [kbps]</b>	2,262-3,070	10,124-11,680	0
<b>PER [%]</b>	0	12,20-20	100
<b>BER [%]</b>	0	0,4-0,95	27-27,92
<b>Modulace</b>	<b>D8PSK</b>	<b>ROBO(c)</b>	<b>BPSK(c)</b>
<b>RSSI [dBμV]</b>	98-105	98-107	92-107
<b>SNR [dB]</b>	1-4	-9 – 4	-10 – 5
<b>Rychlost [kbps]</b>	0	4,000-4,480	7,532-9,130
<b>PER [%]</b>	100	0	31-37
<b>BER [%]</b>	45,43-46,42	0	9,2-12,47



Obr. 17: Výsledek provozního měření při BPSK

## 9.2. Zhodnocení výsledků

Toto měření mělo za úkol prověřit funkčnost nové verze C2000 Power Line Modem Developer's Kit (čtvrtá verze) a hlavně porovnat tento kit s předchozí verzí (TMDSPCLKIT-V3), se kterou bylo také vykonáno testovací měření (viz 7). Oba dva standardy G3-PLC a PRIME byly testovány ve třech režimech komunikace, jak tomu bylo u předešlého experimentu (PHY test, přenos souboru a testování provozu).

### PHY test:

Pro PHY test byly použity přednastavené konfigurace modulací s FEC u PRIME (viz Tabulka 13) a čtyři modulace bez FEC u G3-PLC (viz Tabulka 16). Nejvyšší rychlosti bylo dosaženo u standardu G3-PLC při použití modulace DBPSK, která vykazovala rychlost přenosu dat až 13,056 kbps. Naopak modulace DQPSK vypadávala při komunikaci a D8PSK vůbec komunikaci nenavázala. Je to z důvodu malé robustnosti těchto modulací. U PRIME standardu bylo dosaženo nejvyšší rychlosti při modulaci D8PSK+FEC, která se pohybovala od 4 do 6,5 kbps.

**Přenos souboru:**

U přenosu souboru standardu bylo dosaženo nejvyšší rychlosti při G3-PLC u modulace BPSK 1,364 kbps (viz Tabulka 17). Z důvodu rušení, komunikace vypadávala při modulaci QPSK a při D8PSK nebyla vůbec navázána. PRIME standard dosáhl nejvyšší rychlosti u nastavení DQPSK+FEC 1,2 kbps (viz Tabulka 14).

**Testování provozu:**

Při testování provozu byla naměřena nejvyšší rychlost u G3-PLC standardu (viz Tabulka 18) u modulace BPSK, kde rychlost dosahovala až 11,680 kbps. Ostatní konfigurace u G3-PLC s modulacemi QPSK a D8PSK komunikaci nenavázala. U PRIME standardu (viz Tabulka 15) bylo dosaženo nejvyšší rychlosti také u modulace DBPSK s kódováním FEC. U PRIME standardu na rozdíl od G3-PLC standardu byly změřeny rychlosti u všech konfigurací.

**Celkové zhodnocení:**

Z výsledků měření obou standardů v domácím prostředí vychází nejlépe modulace DBPSK, což je dvoustavová fázová modulace. Jelikož přenáší pouze dva stavy, je mnohem odolnější vůči rušení okolí na rozdíl od modulací DQPSK (čtyřstavová) a D8PSK (osmistavová), které sice přenesou více informací, ale jsou náchylnější na rušení.



## 10. Porovnání různých verzí modemu TMDSPCKIT

### 10.1. Porovnání z hlediska provedených experimentů

V této kapitole jsou popisovány rozdíly mezi naměřenými hodnotami modemů TMDSPCKIT-V3 a novější verzí TMDSPCKIT-V4.

#### PHY test:

Při porovnání výsledků PHY testu obou experimentálních měření (viz Tabulka 19) je nutné brát v úvahu skutečnost, že první měření s verzí 3 bylo vykonáno v prostředí s nižším rušením než měření s verzí 4. Je zde vidět znatelný rozdíl hlavně mezi hodnotami u PRIME standardu. Tento rozdíl je způsoben tím, že PRIME standard je méně robustní než G3-PLC.

Tabulka 19: Porovnání výsledků PHY testu dvou experimentálních měření

Verze kitu	TMDSPCKIT-V3		TMDSPCKIT-V4	
Standard	PRIME	G3-PLC	PRIME	G3-PLC
Modulace	DBPSK+FEC	DBPSK	DBPSK+FEC	DBPSK
Rychlost [kbps]	19,456	17,408	0,900-4,000	10,336-13,056

#### Přenos souboru:

Rozdíl hodnot pro testování přenosu souboru (viz Tabulka 20) již není tak velký, jak tomu bylo u PHY testu. Je nutné brát v úvahu problematiku měření u verze 4 kitu, kde PRIME standard vykazoval určité problémy.

Tabulka 20: Porovnání výsledků přenosu souboru 72 kB dvou experimentálních měření

Verze kitu	TMDSPCKIT-V3		TMDSPCKIT-V4	
Standard	PRIME	G3-PLC	PRIME	G3-PLC
Modulace	DBPSK	BPSK	DBPSK	BPSK
Rychlost [kbps]	1,385	4,965	0,920	1,364

#### Testování provozu:

U testování provozu lze dobře vidět, kolik si rušivé prostředí vyžádalo na hodnotě rychlosti přenosu (viz Tabulka 21). Vezmeme-li si maximální hodnoty, kterých

dosahovala komunikace u druhého měření a porovnáme s prvním měřením, rozdíl se u obou standardů pohybuje okolo cca 5 kbps.

Tabulka 21: Porovnání výsledků testování provozu dvou experimentálních měření

Verze kitu	TMDSPCKIT-V3		TMDSPCKIT-V4	
Standard	PRIME	G3-PLC	PRIME	G3-PLC
Modulace	DBPSK+FEC	BPSK	DBPSK+FEC	BPSK
Rychlost [kbps]	17,440	15,360	9,920-12,000	10,124-11,680

## 10.2. Porovnání z technického hlediska

V této kapitole jsou popisovány technické rozdíly mezi modemy TMDSPCKIT a chyby, které se vyskytly při měření s modemem TMDSPCKIT-V4.

### 10.2.1. Software

Velkou výhodou při konfiguraci TMDSPCKIT-V4 modemu je, že není použito nové softwarové prostředí, ale je použito stejné, jak tomu bylo u TMDSPCKIT-V3. Bylo nutné pouze nainstalovat novou verzi (2.99) neboť starší verze (2.90), která byla použita u prvního experimentálního měření nekomunikovala s modemem.

Častým problémem u TMDSPCKIT-V4 byla komunikace softwarového prostředí s operačním systémem počítače. Při práci na Windows XP program Zero-config často vykazoval chyby a bylo nutné program vypnout a modem následně restartovat. Bylo také nutné použít nový firmware pro oba standardy. Starší firmware nebylo možné nahrát do modemu.

### 10.2.2. Hardware

Z hlediska hardwaru obě verze TMDSPCKIT využívají čip AFE03 [29]. Čip byl vybrán, protože je to levné, integrované PLC analog front-end (AFE) zařízení. Je schopno kapacitního nebo transformátorového spojení s elektrickým vedením. Tento čip je následně řízen mikrokontrolérem. U TMDSPCKIT-V3 je využit mikrokontrolér TMS320F28069 [30] a u TMDSPCKIT-4 je TMS320F28PLC83 [31]. U TMDSPCKIT-V4 na rozdíl od předchozí verze chybí sériové porty. Tyto porty jsou

zřejmě integrovány skrze USB port. Z vykonaného měření byly vyzorovány problémy vztahující se k této skutečnosti.

### **10.2.3. Chyby funkčnosti kitu TMDSPCKIT-V4**

Při konfiguracích a měřeních byly upozorovány určité chyby softwaru a samotných modemů TMDSPCKIT-V4. Konfigurace samotných modemů byla prováděna na dvou počítačích. První počítač měl nainstalovaný Windows 7 (SP1) a druhý Windows XP (SP3). Na obou počítačích byl nainstalován program Zero-config GUI (v2.99). Na druhém počítači, s Windows XP, vykazovala tato verze nestálost a při ukončení určitého měření program vykazoval chybu a bylo nutné ho vypnout a následně i restartovat modem. Tato verze programu byla nutná z důvodu špatné nebo vůbec žádné podpory starších verzí pro TMDSPCKIT-V4.

### **10.2.4. Problém komunikace u TMDSPCKIT-V4 při PRIME standardu**

Součástí balení kitu je návod pro sestavení jednoduché komunikace mezi modemy pro ověření funkčnosti. V návodu bylo uvedeno, aby se diagnostický port (Diagnostic Port) a port pro data (Data Port) přepnuly ze stavu SCI-B do stavu SCI-A, aby byla komunikace funkční.

#### **Porty:**

- Data port - používá se pro samotnou PLC komunikaci
- Diagnostic port – používá se pro posílání diagnostických zpráv mezi modemem a programem.

#### **Stavy:**

- SCI-A označuje připojení sériového PLC portu
- SCI-B označuje připojení USB PLC portu.

Při testování bylo upozorováno, že tento návod je pouze pro G3-PLC standard. Při testování PRIME standardu po přepnutí obou portů do stavu SCI-A nebylo možné přeposílání zpráv pro ověření komunikace nebo přenos souboru, ale PHY test a testování provozu byly plně funkční. Pro možnost posílání zpráv a souborů bylo nutné diagnostic port přepnout do stavu SCI-B a data port do stavu SCI-A. Bohužel i při této

konfiguraci po jednom úspěšném přenosu souboru se komunikace opět přerušila a bylo nutné modem restartovat a znovu nastavit konfiguraci.

### **10.2.5. Absence funkcí**

Na rozdíl od předchozí verze, u TMDSPCKIT-V4 při PRIME standardu nebyla možnost zapnout robustní mód (ROBO). Navíc u standardu PRIME chyběly variace modulace DBPSK +  $\frac{1}{4}$  REP,  $\frac{1}{8}$  REP.

Důležitým problémem je absence hlubší dokumentace popisující funkčnost u modemu TMDSPCKIT-V4 a hlavně absence jakékoliv dokumentace popisující užití PRIME standardu na těchto modemech. K tomuto problému se vztahuje chyba komunikace u PRIME standardu (viz 10.2.4).

Dalším vyzorovaným nedostatkem je absence standardu IEEE 1901.2, o kterém se píše v článku o tomto kitu [28]. Na internetových stránkách Texas Instruments nebyl k sehnání žádný firmware nebo jakákoliv dokumentace popisující užití tohoto standardu v modemech TMDSPCKIT-V4. Jediná dokumentace vztahující se k standardu IEEE 1901.2 byla pro verzi TMDSPCKIT-V4 ARIB, která je určena do ARIB pásma.

## **10.3. Zhodnocení**

Nelze jednoznačně určit, který z modemů je lepší. Verze 3 byla při měření stabilnější a nebylo nutné často modem restartovat. U verze 4 byla problémem právě nutnost častého restartu. Nelze zcela určit, zda to byl problém softwaru nebo samotného modemu při komunikaci s počítačem. Je nutné přihlížet také k tomu, že TMDSPCKIT-V4 je nově na trhu (od 10. června 2014) a zřejmě nebyly vychytány všechny problémy.

### **Veškeré rozdíly a chyby TMDSPCKIT-V4:**

- Absence robustního režimu (ROBO) u PRIME standardu.
- Absence variace modulace DBPSK +  $\frac{1}{4}$  REP,  $\frac{1}{8}$  REP.
- Absence standardu IEEE 1901.2.
- Absence hlubší dokumentace funkčnosti modemů.
- Absence jakékoliv dokumentace popisující užití PRIME standardu.
- Nebyla možnost nahrání starších firmwarů.

- Nutnost novější verze softwarového prostředí.
- Špatná funkčnost novějších verzí softwarového prostředí s Windows XP.
- Integrace sériového portu do USB.
- Špatná funkčnost PRIME standardu.

## 11. PLC komunikační modemy MT39-L1-ver.R

Výrobce modemů MT39-L1-ver.R [32] (viz Obr. 18) je firma ModemTec z Třince [33]. Jsou to PLC komunikační modemy určené pro transparentní přenos dat ze sériové linky (RS 232/485) po elektrické síti 230V/50Hz na sériovou sběrnici (RS 232/485).

Tyto modemy jsou založeny na technice jedné nosné na rozdíl od modemů TMDSPLCKIT, které jsou založeny na OFDM technice. Technika jedné nosné znamená, že užitečná data jsou namodulována pouze na jednu nosnou frekvenci, kterou se přenášejí po elektrickém vedení.



Obr. 18: Měřicí modem MT39-L1-ver.R [32]

Modemy jsou vybaveny sériovými rozhraními RS 232 a RS 485, které mohou sloužit pro připojení k PC nebo v průmyslovém prostředí k elektroměrům. Modemy se mohou nacházet ve dvou stavech:

- **Provozní stav:** Modul může komunikovat buď po lince RS232 nebo RS485. Výběr linky se provádí v programovatelném stavu.
- **Programovací stav:** Je stav, kde se nastavují základní parametry modemů.

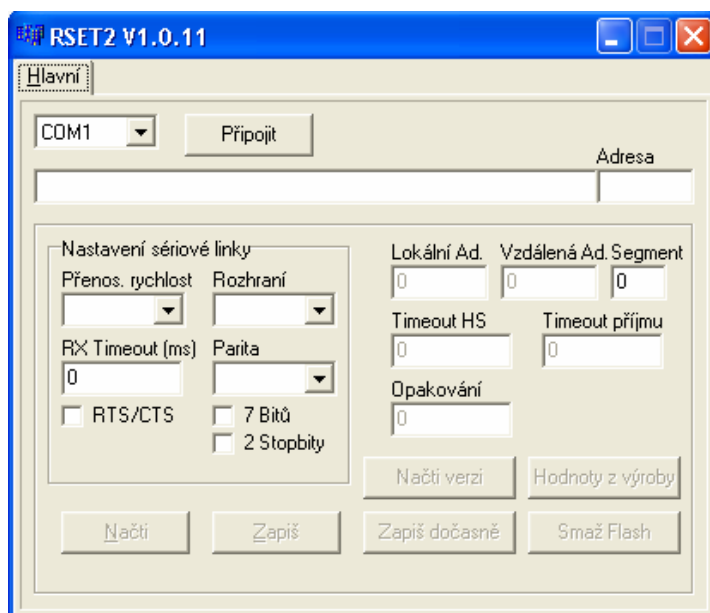
Přepínání mezi stavy se provádí pomocí přepínače modulu kanálu, který je umístěn v zadní části modemů.

Modemy jsou založeny na modulaci DBPSK, což je diferenciální dvoustavové klíčování. Frekvence nosné se pohybuje v rozmezí 60 kHz – 145 kHz. Mohou pracovat ve dvou režimech:

- **Párový režim:** Pouze dva modemy spolu komunikují.
- **Síťový režim:** Jeden modul bude master a ostatní jako slave.

## 11.1. Prostředí RSET (v.1.0.11)

Pro konfiguraci modemu MT39-L1-ver.R byl použit program RSET. Toto softwarové prostředí nebylo nutné instalovat, pouze stačilo spustit a vybrat správný port. Program RSET slouží čistě pro konfiguraci parametrů modemu. Pro provádění testu přenosu byl použit program Hyperterminal a pro vykreslování grafu byl použit program Serial Port Throughput Monitor.



Obr. 19: Ukázka programového prostředí RSET

### Popis jednotlivých položek:

- Přenos. rychlost: Nastavení přenosové rychlosti.
- Rozhraní: Výběr komunikačního rozhraní.
- RX Timeout (ms): Pauza, kterou modem vyhodnotí jako konec datagramu.
- Parita: Nastavení parity.
- RTS/CTS: Systém přenosu „bod-bod“ s řízením RTS/CTS.
- 7 Bitů, 2 Stopbity: Nastavení sériového portu do režimu přenosu 7 bitů, 2 stopbitů.
- Lokální Ad.: Adresa modemu v rámci PLC sítě.
- Vzdálená Ad.: Adresa vzdáleného modemu.

- Segment: Logický segment PLC sítě (pro komunikaci musí mít oba nastavenou stejnou hodnotu).
- Timeout HS (Handshake): Doba, po kterou modem čeká na potvrzovací paket, než začne znovu vysílat.
- Timeout příjmu: Doba, po kterou modem čeká na další paket, než ukončí komunikaci.
- Opakování: Počet opakování po vypršení Timeoutu HS.



## **12. Experimentální měření PLC modemu MT39-L1-ver. R**

Bylo provedeno experimentální měření pomocí modemu MT39-L1-ver.R. Podmínky byly totožné, jako v předchozím měření (viz 8).

**Parametry modemu byly nastaveny následovně:**

- Přenosová rychlost: 19 200 bps
- RX Timeout: 2 ms
- RTS/CTS: zapnuto
- Rozhraní: RS232
- Parita: NONE
- 7 Bitů: vypnuto
- 2 Stopbity: vypnuto
- Timeout HS: 170 ms
- Timeout příjmu: 170 ms
- Opakování: 3

### **12.1. Výsledky měření rychlosti PLC modemů**

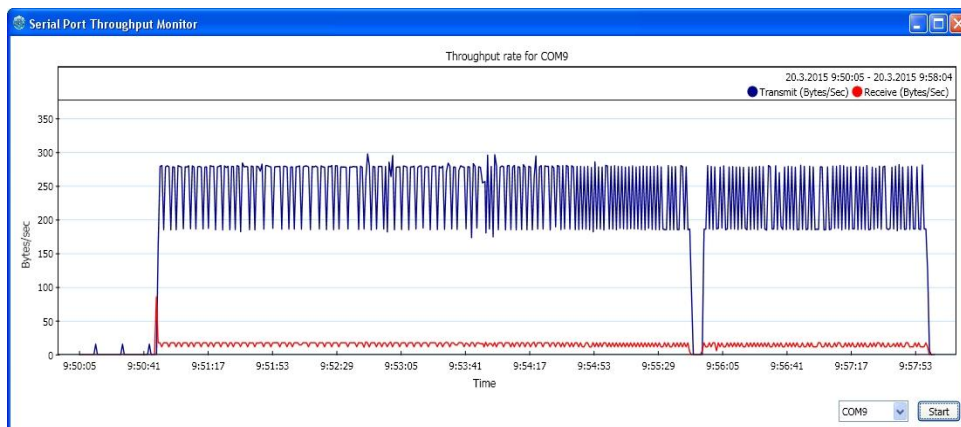
V této kapitole jsou vypsány výsledky jednotlivých měření rychlosti přenosu signálu.

#### **12.1.1. Vysílač v blízkosti zdroje rušení**

Po zapnutí modemů a sestavení spojení pomocí programu Hyperterminal, byl vyslán soubor o velikosti 72 kB. Vysílačem byl nastaven počítač s Windows XP. Modem, který byl ovládán tímto počítačem, byl zapojen do sítě 10 m od měniče. Příjímačem byl počítač s Windows 7, který byl umístěn v prvním patře. Hodnota propustnosti naměřená programem Hyperterminal se pohybovala od 1,570 kbps do 1,600 kbps.

Na obrázku 20 je zobrazen celý průběh komunikace měřený na počítači s Windows XP, který byl nastaven jako vysílač. Modrá křivka značí odeslaná data a červená křivka značí přijatá potvrzení o tom, že přijímač data přijal. Z obrázku je patrné, že komunikace byla převážně stabilní až na jeden výpadek. Jsou zde patrné tři malé výstupky na začátku grafu, které představují vyslané pakety protějšimu modemu

pro potvrzení příjmu. S tím je právě spjatý Timeout HS, který byl nastaven na hodnotu 170 ms. Kdyby do této doby nebyl přijat paket potvrzující jeho přijetí byl by pokus ukončen.

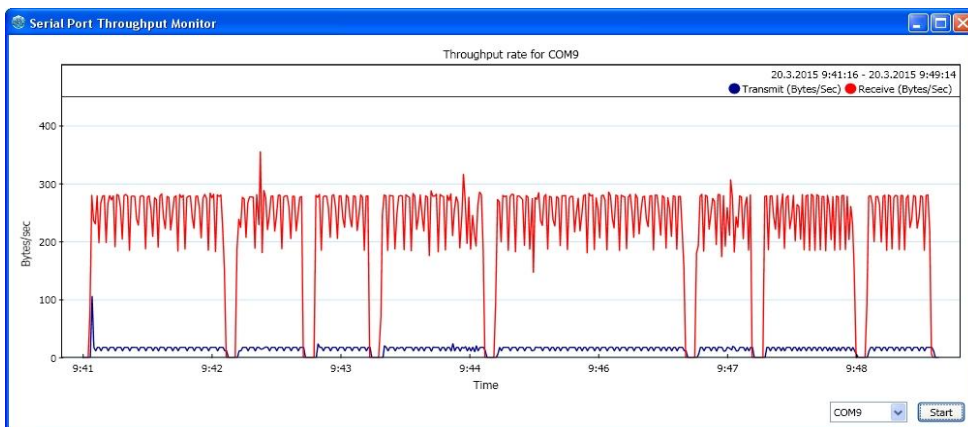


Obr. 20: Komunikace mezi modemy při prvním měření

### 12.1.2. Přijímač v blízkosti zdroje rušení

Při druhém měření bylo ponecháno stejné zapojení, pouze si modemy vyměnily roli. Počítač s Windows XP se stal přijímačem dat a počítač s Windows 7 byl vysílačem. Hodnota propustnosti naměřená při druhém měření, zobrazena programem Hyperterminal se pohybovala od 1,810 kbps do 1,840 kbps.

Na obrázku 21 je zobrazen celý průběh komunikace mezi počítači. Červená křivka značí přijatá data od vysílače a modrá křivka značí odeslané potvrzovací pakety k přijatým datům. Z obrázku je patrné, že komunikace často vypadávala (celkem 7x). Za důvod výpadků lze považovat spínání měniče.



Obr. 21: Komunikace mezi modemy při druhém měření

## 12.2. Zhodnocení výsledků

Z naměřených hodnot je patrný rozdíl v tom, zda jeden či druhý modem byl vysílač nebo přijímač. Rozdíl hodnot se pohybuje cca 0,200 kbps. Je to způsobeno zřejmě tím, že v prvním měření, byl vysílač zapojen do elektrické sítě cca 10 m od měniče, který zapříčinil rušení. Z druhého měření, kdy byl vysílač připojen do sítě cca 60 m od zdroje rušení, lze vidět menší stabilitu a větší počet výpadků během komunikace (viz Obr. 21). Z toho vyplývá, že tyto modemy jsou lehce ovlivnitelné rušením. V případě silnějšího rušení by byl větší počet výpadků až do té míry, že by nebyla navázána komunikace. Výrobce modemu na svých internetových stránkách udává, že modem může dosahovat rychlosti až 10 kbps. Této rychlosti by mohlo být dosaženo pouze za ideálních podmínek bez rušení a ztrát.

Je patrné, že vzdálenost neovlivňuje rychlost přenosu neboť před prvním a druhým měřením byl proveden test funkčnosti obou modemů na trase o délce 5 m. Při tomto testu funkčnosti byla naměřena rychlost 1,820 kbps, což odpovídá hodnotám z druhého měření.

### 13. PLC komunikační modemy EVALKITST7580-1

PLC modemy EVALKITST7580-1 [34] (viz Obr. 22) od firmy STMicroelectronics [35] jsou určeny pro komunikace „point-point“ nebo „point-multipoint“. Tyto modemy jsou založeny na technice jedné nosné stejně jako předešlé modemy od firmy ModemTec (viz 11).



Obr. 22: Měřicí modem EVALKITST7580-1 [35]

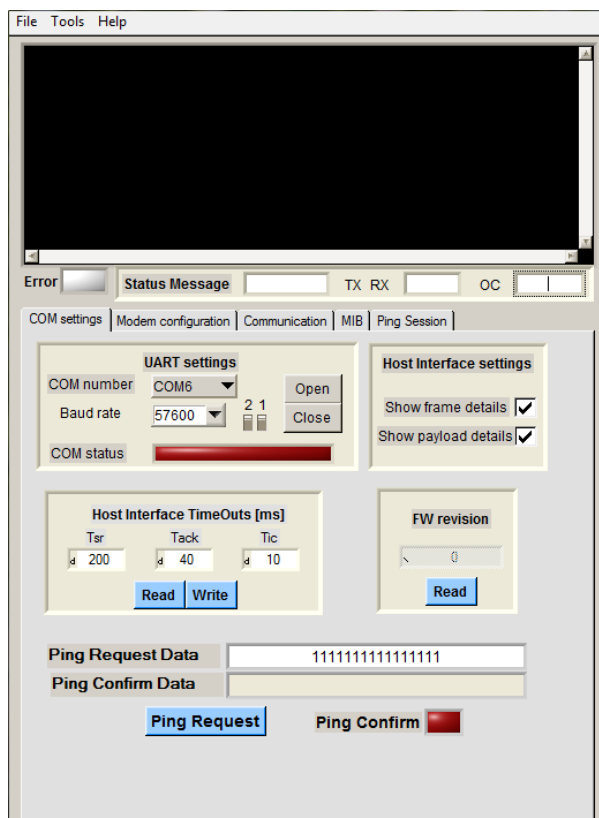
Modem se skládá z desky, na které je osazen čip ST7580, který plně integruje úzkopásmovou komunikaci po elektrické síti. Dalším čipem, který je osazen na desce je STM32F103CBT6. Tento čip řídí komunikaci na základě přijatých sériových dat.

Modemy jsou vybaveny několika rozhraními: USB, SPI, I<sup>2</sup>C, USART a JTAG. Jsou vybaveny možností ukládání/nahrávání dat z/do externí  $\mu$ -SD karty.

Na rozdíl od předchozích modemů od firmy ModemTech mají větší možnost nastavení parametrů. Důležitý parametr, který lze nastavit je možnost Single/Dual-channel. V Single-channel modu přijímač naslouchá vysoké frekvenci a nosné s nižší frekvencí jsou ignorovány. V Dual-channel modu přijímač naslouchá oběma kanálům. Jakmile detekuje platný rámec, tak se poslech na druhém kanálu zastaví. Další možné parametry jsou: frekvence nosné, délka zprávy, délka preamble, nastavení CRC, ...

## 13.1. Prostředí ST7580 GUI

Pro konfiguraci modemů EVALKITST7580-1 byl použit program ST7580 GUI (viz Obr. 23). Po instalaci softwaru bylo nutné vybrat správný komunikační port a požadovanou přenosovou rychlost (tovární nastavení modemů je 57 600 bps).



Obr. 23: Ukázka programového prostředí ST7580 GUI

### Popis jednotlivých položek:

- Console box (konzolové okno): Zobrazuje posílané zprávy mezi modemem a programem a mezi modemy.
- COM settings: Základní nastavení komunikace s modemem.
- Modem configuration: Konfigurace modemů a nastavení parametrů fyzické vrstvy.
- Communication: Nastavení vysílacích dat a zobrazení parametrů přijatých dat.
- MIB: Soubor pravidel pomocí, kterých se nastavují parametry fyzické i linkové vrstvy.
- Ping Session: Možnost provedení ping testu s možností jeho nastavení.

## 14. Experimentální měření PLC modemu

### EVALKITST7580-1

Bylo provedeno další experimentální měření za použití modemů EVALKITST7580-1 od firmy STMicroelectronics. Veškerá měření byla provedena ve stejném prostředí a podmínkách jako tomu bylo v předchozích experimentech (viz 8).

Bohužel nebylo možné určit hodnotu přenosové rychlosti neboť tuto funkci program ST7580 GUI neměl. Lze se pouze řídit tabulkou teoretických hodnot rychlostí různých modulací (viz Tabulka 22). Rychlosti v tabulce lze považovat za teoretické rychlosti na aplikační vrstvě.

Tabulka 22: Tabulka možných teoretických rychlostí [35]

<b>Modulace</b>	<b>Symbol rate [kbps]</b>	<b>Informačních bitů na symbol</b>	<b>Přenosová rychlost [kbps]</b>
<b>BPSK</b>	9,600	1	9,600
<b>QPSK</b>	9,600	2	19,200
<b>8PSK</b>	9,600	3	28,800
<b>BPSK kódované</b>	9,600	1/2	4,800
<b>QPSK kódované</b>	9,600	1	9,600
<b>BPSK kódované s PNA algoritmem</b>	9,600	1/4	2,400

### 14.1. Výsledky experimentů

V této kapitole jsou vypsány výsledky jednotlivých měření.

#### 14.1.1. Ověření možností komunikace

V prvním měření bylo využito možnosti testu komunikace v záložce „Communication“. První modem byl zapojen do sítě v blízkosti měniče ve vzdálenosti cca 10 m od něj. Tento modem byl připojen k PC s Windows XP. Druhý modem byl připojen do sítě cca 60 m od prvního modemu a byl připojen k PC s Windows 7.

Měření bylo provedeno několikrát, aby byl zajištěn objektivní výsledek. V podstatě všechny konfigurace modulace fázového klíčování (PSK) navázaly komunikaci. U modulací QPSK a 8PSK byly sice potvrzující zprávy přijaty, ale jejich obsah byl poškozen.

Modemy umožňují i komunikaci pomocí modulace kmitočtového klíčování (FSK). U žádné přenosové rychlosti (1,2 kbps, 2,4 kbps, 4,8 kbps, 9,6 kbps) nebyla navázána komunikace (nebyla přijata potvrzující zpráva).

### 14.1.2. Ping Session

V druhém měření byl proveden ping test pro zjištění ztrátovosti komunikace. Modemy byly ponechány na stejných místech jako v předchozím měření.

Tabulka 23: Výsledky Ping Session testu

Modulace	SNR [dB]	Ping OK	Fail Cycles	Ping wrong link
<b>BPSK</b>	12	100	0	0
<b>QPSK</b>	8	98	2	0
<b>8PSK</b>	10	89	2	9
<b>BPSK kódované</b>	9	100	0	0
<b>QPSK kódované</b>	11	100	0	0
<b>BPSK kódované s PNA algoritmem</b>	9	100	0	0

#### Popisky:

- SNR: kvalita signálu v decibelech
- Ping OK: paket byl v pořádku přijat bez chyby a bylo odesláno potvrzení (ACK)
- Fail Cycles: nepřijatý paket po uplynutí doby mezi posílanými pakety
- Ping wrong link: paket byl přijat, ale se špatným kontrolním součtem (CRC)

## 14.2. Zhodnocení výsledků

Z výsledků měření ověření komunikace je patrné, že modem je odolný vůči rušení při použití binárního fázového klíčování BPSK. Důležitým rozdílem je, zda modem je

v blízkosti měniče používán jako vysílač nebo přijímač. V případě, kdy byl používán jako vysílač, přijaté zprávy na druhém modemu byly v některých případech přijaty s chybou. V opačném případě použití jako přijímač nebyly zprávy poškozeny chybou přenosu. V případě, že jsou modulace zabezpečeny kódováním, je komunikace v obou případech bezproblémová.

Z výsledků Ping Session (viz Tabulka 23) mají 100% úspěšnost přenosu ty modulace, které jsou zabezpečené kódováním a samotná modulace BPSK. Jak již bylo řečeno v minulých kapitolách, je to z důvodu její jednoduchosti a odolnosti. Nejvíce chyb má modulace 8PSK, kde je nejvíce přijatých paketů v Ping wrong link, což znamená, že paket byl přijat, ale jeho kontrolní součet nesouhlasí s ostatními přijatými pakety.



## Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo prostudovat problematiku PLC a čtyř dostupných standardů používaných pro úzkopásmovou komunikaci po silnoprůdém vedení. Všechny standardy byly porovnány a důležité parametry byly vloženy do přehledné tabulky (viz Tabulka 2). Praktickou částí práce bylo provedení experimentálních měření za použití PLC modemů založených na technice OFDM (viz 6) a technice jedné nosné (viz 11, 13). Experimenty s modemy TMDSPCKIT-V4, MT39-L1-ver.R a EVALKITST7850-1 byly vykonány v domácím prostředí jednopatrového rodinného domu, kde byla veškerá elektrická síť vygenerována z DC/AC měniče pro 12 fotovoltaických panelů (viz 8).

Měřicími kity TMDSPCKIT od Texas Instruments byly ověřeny teoretické vlastnosti a rychlosti popsané výrobcem pro standardy PRIME a G3-PLC. Výsledky byly následně popsány a vysvětleny (viz 7, 9). Ve výsledcích měření při porovnávání standardu PRIME a G3-PLC vychází G3-PLC jako lepší standart pro úzkopásmovou komunikaci pro větší vzdálenosti a aplikace nevyžadující vysoké rychlosti přenosu a objemy dat. Sice PRIME standart vykazuje vyšší rychlost na fyzické vrstvě než standart G3-PLC (cca o 24 kbps), ale důležitým rozdílem je, že G3-PLC vykazuje vyšší robustnost než PRIME, což v dnešní době hodně znamená kvůli neustálému zatěžování elektrické sítě. Z hlediska modulací vychází jako nejlepší pro zavedení do reálného prostředí modulace dvoustavového klíčování (BPSK). Ve všech měřeních jak u PRIME nebo G3-PLC vychází tato modulace nejlépe a to z důvodu její jednoduchosti a její velké odolnosti vůči rušení.

Oba modemy TMDSPCKIT byly navzájem porovnány z různých hledisek pro zjištění jejich rozdílů (viz 10). Prozatímní nevýhodou TMDSPCKIT-V4 (pro CENELEC pásmo) se jeví jeho jistá nestabilita na starších systémech (WinXP) a celkově nedoladěný systém se špatnou komunikací s PRIME firmwarem. Důležitým nedostatkem je absence jakékoliv dokumentace nebo softwarového podkladu pro standart IEEE 1901.2. Jediná dokumentace vztahující se k tomuto standardu byla pro verzi s aplikací na ARIB pásmo.

Modemy MT39-L1-ver.R neměly žádný interface pro provedení experimentů, a proto bylo nutné využít jiných softwarových prostředků pro zjištění komunikačních

parametrů. Pro přenos souboru byl použit Hyperterminal a pro sledování komunikace byl použit Serial Port Throughput Monitor. Modemy EVALKITST7850-1 měly vlastní softwarové prostředí ST7580 GUI, ale nevýhodou tohoto prostředí je absence možnosti sledovat hodnoty rychlosti komunikace. Lze se pouze orientovat podle přiložené tabulky přenosových rychlostí pro určité modulace (viz Tabulka 22). Maximální rychlost u modemu MT39-L1-ver.R byla 1,840 kbit/s pro modulaci BPSK. Tyto modemy se jeví jako velmi stabilní a odolné vůči rušení. U modemů EVALKITST7850-1 lze předpokládat, že největší rychlost byla u modulace 8PSK s 28,8 kbit/s. Obě rychlosti jsou z komunikace na aplikační vrstvě.

Část této práce byla prezentována na STUDENT EEICT 2015 soutěži, která je součástí perFEKT JobFair fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií na VUT v Brně [37].

## Literatura

- [1] Komunikujeme po silových rozvodech (1. část). *Hw.cz* [online]. 21.2.2011 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/komunikujeme-po-silovych-rozvodech-1-cast.html>
- [2] Problematika PLC. KOŠŤÁL, Karel. OK1SQK. *Radioklub OK1SQK Holice* [online]. 30.05.2008 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://ok1khl.com/view.php?cislocianku=2008053001>
- [3] PRIME ALLIANCE. *PRIME Technology Whitepaper*. v1.0. PRIME Alliance, 2008. Dostupné z: [http://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2013/03/MAC\\_Spec\\_white\\_paper\\_1\\_0\\_080721.pdf](http://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2013/03/MAC_Spec_white_paper_1_0_080721.pdf)
- [4] EVM8K Evaluation Systems. 2010. *EnVer* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.enverv.com/evm8k-evaluation-system.html>
- [5] Power Line Communications. 2015. *Atmel Coporation* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/products/smart-energy/power-line-communications/?tab=tools>
- [6] Power Line Communications (PLC) - Products. 2015. *Texas Instruments* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lscs/ti/apps/smartgrid/plcmodem/product.page>
- [7] VIGNERON, Jean a Kaveh RAZAZIAN. G3-PLC ALLIANCE. *G3-PLC Alliance Technical Presentation*. 2012. Dostupné z: <http://www.g3-plc.com/sites/default/files/G3-PLC%20Alliance%20Technical%20Presentation.pptx>
- [8] STEINBAUER, Petr. *Internet po elektrické síti* [online]. 2003, 12.12.2003 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/stei/studium/nm/>
- [9] PAVELKA, Ondřej. *Internet ze zásuvky ? Ano, ale...* [online]. 2000 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00034/index.html>
- [10] GALLI, Stefano, Anna SCAGLIONE a Zhifang WANG. For the Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid. *Proceedings of the IEEE*. 2011, vol. 99, issue 6, s. 998-1027. DOI: 10.1109/jproc.2011.2109670.
- [11] Cool Phoenix 2 - Flexible PLC Modem Solution. 2010. *RENESAS* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://www.renesas.eu/applications/key\\_technology/connectivity/plc\\_cool\\_phoenix/index.jsp](http://www.renesas.eu/applications/key_technology/connectivity/plc_cool_phoenix/index.jsp)
- [12] MAX2992. 2015. *Maxim Integrated* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en/products/comms/powerline-networking/MAX2992.html>

- [13] An Overview, History, and Formation of IEEE P1901.2 for Narrowband OFDM PLC. *Maxim integrated* [online]. 2013 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5676>
- [14] LOGVINOV, Oleg. *Netricity PLC and the IEEE P1901.2 Standard*. Dostupné z: [http://www.homeplug.org/media/filer\\_public/e6/01/e601fa7c-078d-4347-bb30-9ff6c28efb12/netricity.pdf](http://www.homeplug.org/media/filer_public/e6/01/e601fa7c-078d-4347-bb30-9ff6c28efb12/netricity.pdf)
- [15] *Power-Line Communication - Ricerca di Sistema*. Dostupné z: [http://www.ricercadisistema.it:8080/site/binaries/content/assets/rse-sola-lettura/pregresso/2002/Metodi\\_e\\_strumenti\\_innovativi\\_per\\_ridurre\\_la\\_vulnerabilit\\_e\\_garantire\\_disponibilit\\_integrit\\_sicurezza\\_dei\\_sistemi\\_distribuiti/a1-038330-a3.pdf](http://www.ricercadisistema.it:8080/site/binaries/content/assets/rse-sola-lettura/pregresso/2002/Metodi_e_strumenti_innovativi_per_ridurre_la_vulnerabilit_e_garantire_disponibilit_integrit_sicurezza_dei_sistemi_distribuiti/a1-038330-a3.pdf)
- [16] SM2480. 2015. *Semitech Semiconductor* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.semitechsemi.com/solutions/sm2480.php>
- [17] KONDO, Yoshihiro. *Standardization on Home NW iin IITU-T SG15*. 7.3.2011. Dostupné z: [http://www.ttc.or.jp/files/4513/0042/4715/S2-1\\_Standardization%20on%20Home%20NW%20in%20Standardization%20on%20Home%20NW%20in%20IITU-T%20SG15.pdf](http://www.ttc.or.jp/files/4513/0042/4715/S2-1_Standardization%20on%20Home%20NW%20in%20Standardization%20on%20Home%20NW%20in%20IITU-T%20SG15.pdf)
- [18] ROSSELLO-BUSQUET, Ana. G.hnem for AMI and DR. 2012 *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*. IEEE, 2012, s. 111-115. DOI: 10.1109/ICCNC.2012.6167382. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6167382>
- [19] NASSAR, Marcel, Jing LIN, Yousof MORTAZAVI, Anand DABAK, Il KIM a Brian EVANS. Local Utility Power Line Communications in the 3–500 kHz Band: Channel Impairments, Noise, and Standards. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2012, vol. 29, issue 5, s. 116-127. DOI: 10.1109/MSP.2012.2187038. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6279590>
- [20] SHAVER, Don. *Low Frequency, Narrowband PLC Standards for Smart Grid – The PLC Standards Gap!*. 3.12.2009. Dostupné z: [http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs\\_Globecom\\_2009/6\\_-12-03-09\\_shaver\\_smart\\_grid\\_panel\\_final.pdf](http://cms.comsoc.org/SiteGen/Uploads/Public/Docs_Globecom_2009/6_-12-03-09_shaver_smart_grid_panel_final.pdf)
- [21] C2000 Power Line Modem Developer's Kit. *Texas Instrument* [online]. 1995 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/tmdsplckit-v3>
- [22] *TI PLC Development Kit User Guide*. Texas Instrument, 22.3.2012.
- [23] Signal-to-Noise Ratio Monitor. *Juniper Networks* [online]. 15.10.2013 [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: [http://www.juniper.net/documentation/en\\_US/network-director1.5/topics/reference/general/monitor-snr.html](http://www.juniper.net/documentation/en_US/network-director1.5/topics/reference/general/monitor-snr.html)

- [24] JERÁBEK, Jan. *Komunikační technologie VUT v Brně*: VUTIUUM 2013. ISBN 978-80-214-4713-4.
- [25] NOVOTNÝ, Vít. *Architektura sítí*. VUT v Brně: VUTIUUM, 2012 ISBN 80-214-2254-8, 2011.
- [26] MLYNEK, Petr, Martin KOUTNY, Jiri MISUREC a Zdenek KOLKA. Measurements and evaluation of PLC modem with G3 and PRIME standards for Street Lighting Control. *18th IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*. IEEE, 2014, s. 238-243. DOI: 10.1109/ISPLC.2014.6812318. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6812318>
- [27] Power Line Communications Kit for CENELEC Frequency Band. *Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/tool/TMDSPLCKITV4-CEN?DCMP=gma-gsg-sgplc-tmdsplckitv4&HQS=gma-indu-gsg-sgplc-tmdsplckitv4-pr-evm3-en>
- [28] Texas Instruments creates new power line communication (PLC) modems to support all three major standards across multiple spectrum bands. *Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://newscenter.ti.com/2014-06-10-Texas-Instruments-creates-new-power-line-communication-PLC-modems-to-support-all-three-major-standards-across-multiple-spectrum-bands>
- [29] AFE031. *Texas Instruments* [online]. 2011 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/afe031?DCMP=gma-gsg-sgplc-tmdsplckitv4&HQS=hpa-pa-ene-tmdsplckitv4-pr-pf-en>
- [30] TMS320F28069. *Texas Instruments* [online]. 2010 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/tms320f28069>
- [31] TMS320F28PLC83. *Texas Instruments* [online]. 2014 [cit. 2015-03-16]. Dostupné z: <http://www.ti.com/product/tms320f28plc83>
- [32] MT39-L1-ver. R: Modul PLC komunikace. Dostupné z: [http://www.modemtec.cz/MT39-L1-R-datasheet\\_%C4%8Desk%C3%BD.pdf](http://www.modemtec.cz/MT39-L1-R-datasheet_%C4%8Desk%C3%BD.pdf)
- [33] *ModemTec* [online]. 2006 [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: <http://www.modemtec.cz/cz>
- [34] EVALKITST7580-1. 2012. Dostupné z: [http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data\\_brief/DM00048571.pdf](http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/data_brief/DM00048571.pdf)
- [35] *ST* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.st.com/web/en/home.html>
- [36] First 1Mbps OFDM PLC Modem Based on Prime, G3, G.hnem and IEEE 1901.2. 2011. *Yitran*[online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: <http://www.yitran.com/index.aspx?id=3330&itemID=3188>

- [37] *Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015* [online]. 2015. [cit. 2015-05-10]. ISBN ISBN 978-80-214-5148-3. Dostupné z: [http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2015/sbornik/EEICT-2015-sbornik-komplet\\_v2.pdf](http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2015/sbornik/EEICT-2015-sbornik-komplet_v2.pdf)
- [38] Hybridní měnič Vertex 48V 3kW. 2015. *Ostrovní fotovoltaické elektrárny* [online]. [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://ostrovni-elektrarny.cz/index.php?category=menice-dc-ac-hybridni&detail=NTUwMDUx&detail\\_name=hybridni-menic-vertex-48v-3kw](http://ostrovni-elektrarny.cz/index.php?category=menice-dc-ac-hybridni&detail=NTUwMDUx&detail_name=hybridni-menic-vertex-48v-3kw)

## Seznam zkratek

8PSK – 8 Phase Shift Keying

16-QAM – 16 Quadrature Amplitude Modulation

AES - Advanced Encryption Standard

AFE – Analog Front-End

AMI - Advanced Metering Infrastructure

AMR - Automatic Meter Reading

BER - Bit Error Rate

BPSK – Binary Phase Shift Keying

CDMA - Code Division Multiple Access

CM - Centralized Mode

CS - Convergence Sublayer

CSMA/CA - Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance

D8PSK - Differential 8 Phase Shift Keying

DAP - Domain Access Point

DBPSK - Differential Binary Phase Shift Keying

DM - Domain Master

DQPSK - Differential Quaternary Phase Shift Keying

EEICT – Electrical Engineering, Information and Communication Technologies

FEC - Forward Error Correction

FSK - Frequency Shift Keying

GM - Global Master

GUI - Graphical User Interface

IDB - Inter-Domain Bridge

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

MAC – Media Access Control

MPDU - MAC Protocol Data Units

NN – Nízké napětí

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

P2P - Peer-to-peer

PDU – Protocol Data Unit

PER – Packet Error Rate  
PIB - PRIME Information Base  
PHY – Physical layer  
PLC - Powelline communication  
PSK - Phase Shift Keying  
PRIME - Powerline Intelligent Metering Evolution  
QoS - Quality of Service  
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying  
RSSI - Received Signal Strength Indication  
RX – Receive  
S-FSK – Spread Frequency Shift Keying  
SDU – Service Data Unit  
SNMP - Simple Network Management Protocol  
SNR - Signal to Noise Ratio  
TFTP - Trivial File Transfer Protocol  
TWACS – Two-Way Automatic Communications System  
TX - Transmit  
UM - Unified Mode  
UNB - Ultra Narrow Band  
USD – United States Dollar  
VN – Vysoké napětí